



**Dulce Alexandra  
Lourenço Franco**

**Avaliação das potencialidades do georadar em  
Engenharia Civil**





**Dulce Alexandra  
Lourenço Franco**

**Avaliação das potencialidades do georadar em  
Engenharia Civil**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor associado, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e da Doutora Ana Paula Gerardo Machado, Professora adjunta, do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar.



Dedico este trabalho à minha família e namorado pela presença sempre constante.



## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa**

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Francisco Manuel Carvalho Pinto Fernandes**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Lusíada de Vila Nova de Famalição, Faculdade de Engenharia e Tecnologias

**Prof. Doutor José Claudino de Pinho Cardoso**

professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Ana Paula Gerardo Machado**

professora adjunta do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar





## **agradecimentos**

Gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos os que, directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Claudino de Pinho Cardoso pelo apoio e pelo interesse demonstrado ao longo da realização desta dissertação.

À minha co-orientadora, Professora Doutora Ana Paula Gerardo Machado, pelo apoio, pela disponibilidade e pela dedicação que depositou neste trabalho.

Ao Professor Rui Gonçalves, da área interdepartamental de Física do Instituto Politécnico de Tomar pelo apoio prestado na aquisição prática dos dados de georadar, pela interpretação dos dados do método da resistividade eléctrica, pela leitura do trabalho e pela disponibilidade.

Ao Professor Doutor Francisco Fernandes, pela leitura do trabalho, pelas enriquecedoras sugestões, pela disponibilidade e por ter facultado o equipamento de georadar com a antena de 1,6 GHz para a realização de alguns ensaios.

À Professora Doutora Cristina Costa, pela sugestão de utilizar o georadar na nova ponte de Vila Fria, pela leitura do subcapítulo da ponte e por toda a informação concedida sobre a mesma.

Ao Professor Doutor Mário Quinta, pela possibilidade de aplicar o georadar em Coimbra e pela informação fornecida.

Ao Engenheiro Artur Mendes das Estradas de Portugal pela oportunidade de aplicar o georadar num pequeno troço do IC9 e pela informação facultada.

Ao Engenheiro Rui Belo pelos dados sobre a constituição dos pavimentos do Instituto Politécnico de Tomar.

Ao aluno António José Pereira de Figueiredo e aos seus orientadores Doutor Aníbal Guimarães da Costa e Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, pela cedência dos dados da tese relativa à parede de adobe.

Em especial à minha família e namorado pelo apoio, pela compreensão, pelo carinho e pela motivação que me deu força nos momentos de desânimo.



## **palavras-chave**

Técnicas não destrutivas, radar de prospecção geotécnica, propriedades electromagnéticas, radargrama, tratamento de dados.

## **resumo**

Esta dissertação incide sobre a aplicação de uma técnica geofísica não destrutiva, designadamente o Ground Penetrating Radar (GPR), também denominado por georadar.

Na componente prática deste trabalho são apresentados exemplos de aplicações utilizados para estudar as potencialidades do equipamento de georadar existente no Instituto Politécnico de Tomar. O GPR foi utilizado em dois solos, em pavimentos betuminosos, em duas paredes, em duas lajes de betão armado e numa ponte de alvenaria de pedra.

Os resultados obtidos na aplicação do GPR em solos mostram que este equipamento é adequado para detectar a camada superficial de aterro. Em pavimentos betuminosos o georadar foi apropriado para descobrir a interface entre algumas camadas. Quando utilizado em paredes este equipamento permitiu identificar vazios, objectos no seu interior, detectar as armaduras, determinar o seu espaçamento e verificar o seu alinhamento. Na utilização em lajes de betão armado o GPR foi adequado para detectar as armaduras, determinar o seu espaçamento e verificar o seu alinhamento. No ensaio efectuado na ponte de alvenaria de pedra, o georadar permitiu determinar a espessura do lajedo, confirmar o centro do extradorso da aduela de fecho dos arcos (medidas na escala horizontal) e identificar algumas zonas com presença de humidade.

O equipamento utilizado para aquisição dos dados foi o RAMAC/GPR da MALÁ Geoscience com as antenas blindadas de 250 MHz, 500 MHz, 800 MHz e 1600 MHz, em modo mono-estático.

Os radargramas obtidos foram processados com o software RAMAC GroundVision do Instituto Politécnico de Tomar.

O trabalho desenvolvido permitiu um acumular de conhecimento acerca deste equipamento e assim garantir a sua eficácia num conjunto alargado de aplicações práticas.



**keywords**

Non destructive technique, ground penetrating radar, electromagnetic properties, radargram, data processing.

**abstract**

This thesis focuses on the use of a non-destructive geophysical technique - the Ground Penetrating Radar (GPR) - also known as georadar.

The practical section of this work presents examples of the applications used to study the potential of a GPR equipment owned by the Polytechnic Institute of Tomar (IPT). The GPR has been used to test two kinds of soils, bituminous pavements, two walls, two reinforced concrete slabs and one stone masonry bridge.

The results of the utilization of GPR in soils show that this equipment is appropriate for detecting the surface layer of the embankment. In roads the GPR was appropriate to find an interface between some strata. When applied to walls, the equipment enabled to identify some voids, objects in the interior of the walls, to detect reinforcing bars and to determine its spacing and check its alignment. When used with reinforced concrete slabs, the GPR appears to be suited to detect reinforcing bars, to determine its spacing and check its alignment. As for experiments with the stone masonry bridge, the georadar allowed to determine the thickness of slabs, confirm the centre of the suction face of the arch voussoir (scaled horizontally) and identify any damp areas.

The equipment used for data collection was RAMAC/GPR of MALÅ GEOSCIENCE with 250 MHz, 500 MHz, 800 MHz and 1600 MHz shielded antennas in monostatic mode.

The obtained radargrams have been processed with the software RAMAC GroundVision of the Polytechnic Institute of Tomar.

The work developed enabled to have a better knowledge about this equipment and thus ensure its efficiency in a wide range of practical applications.



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	i
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	ix
Lista de Abreviaturas .....	xi
Lista de Símbolos .....	xiii
1. Introdução .....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objectivos da dissertação .....	1
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
2. Estado da arte.....	3
2.1. Notas históricas .....	3
2.2. Investigação Actual .....	4
2.3. Fundamentos teóricos .....	7
2.3.1. Propagação das ondas electromagnéticas .....	7
2.3.2. Propriedades electromagnéticas do material .....	9
2.3.2.1. Condutividade eléctrica .....	9
2.3.2.2. Permitividade eléctrica .....	10
2.3.2.3. Permeabilidade magnética .....	12
2.3.3. Velocidade de propagação das ondas electromagnéticas .....	13
2.3.4. Profundidade de penetração e resolução .....	14
2.3.5. Coeficientes de reflexão e transmissão.....	15
2.4. Descrição e princípio de funcionamento do GPR .....	17
2.4.1. Equipamento GPR .....	17
2.4.2. Modo de funcionamento .....	18
2.5. Factores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal .....	20
2.5.1. Equipamento e acoplamento da antena à superfície de investigação .....	20
2.5.2. Absorção .....	21
2.5.3. Espalhamento geométrico.....	21
2.5.4. Dispersão .....	22
2.5.5. Atenuação .....	22
2.5.6. Reflexão e transmissão .....	23
2.6. Aquisição de dados .....	23
2.6.1. Métodos de aquisição de dados .....	23
2.6.1.1. Reflexão.....	23
2.6.1.2. Ponto médio comum.....	24
2.6.1.3. Reflexão e refacção de grande ângulo.....	24
2.6.1.4. Tomografia .....	25
2.6.2. Parâmetros de aquisição .....	26
2.6.2.1. Frequência de amostragem .....	26
2.6.2.2. Intervalo entre traços .....	27
2.6.2.3. Janela temporal .....	27
2.6.2.4. Separação da antena.....	28
2.7. Processamento de dados .....	29
2.8. Potencialidades e incertezas do método GPR.....	31

3.	Casos práticos de aplicação do georadar em Engenharia Civil.....	32
3.1.	Introdução.....	32
3.2.	Aplicação em Geologia .....	32
3.2.1.	Caso de estudo prático 1 .....	32
3.2.1.1.	Local em estudo .....	32
3.2.1.2.	Aplicação do georadar.....	33
3.2.1.3.	Tratamento e análise de resultados.....	34
3.2.2.	Caso de estudo prático 2.....	36
3.2.2.1.	Local em estudo .....	36
3.2.2.2.	Aplicação do georadar.....	38
3.2.2.3.	Tratamento e análise de resultados.....	39
3.2.2.4.	Método da resistividade eléctrica .....	42
3.2.2.5.	Análise de resultados.....	44
3.2.3.	Conclusões .....	45
3.3.	Aplicação em Pavimentos .....	46
3.3.1.	Caso de estudo prático 1 .....	46
3.3.1.1.	Local em estudo .....	46
3.3.1.2.	Aplicação do georadar.....	48
3.3.1.3.	Tratamento e análise de resultados.....	48
3.3.2.	Caso de estudo prático 2.....	51
3.3.2.1.	Local em estudo .....	51
3.3.2.2.	Aplicação do georadar.....	53
3.3.2.3.	Tratamento e análise de resultados.....	53
3.3.3.	Caso de estudo prático 3.....	55
3.3.3.1.	Local em estudo .....	55
3.3.3.2.	Aplicação do georadar.....	57
3.3.3.3.	Tratamento e análise de resultados.....	57
3.3.4.	Conclusões .....	59
3.4.	Aplicação em paredes.....	60
3.4.1.	Caso de estudo prático 1 .....	60
3.4.1.1.	Local em estudo .....	60
3.4.1.2.	Aplicação do georadar.....	63
3.4.1.3.	Tratamento e análise de resultados.....	64
3.4.2.	Caso de estudo prático 2.....	70
3.4.2.1.	Local em estudo .....	70
3.4.2.2.	Aplicação do georadar.....	70
3.4.2.3.	Tratamento e análise de resultados.....	72
3.4.3.	Conclusões .....	76
3.5.	Aplicação em lajes de betão armado .....	76
3.5.1.	Caso de estudo prático 1 .....	77
3.5.1.1.	Local em estudo .....	77
3.5.1.2.	Aplicação do georadar.....	78
3.5.1.3.	Tratamento e análise de resultados.....	79
3.5.2.	Caso de estudo prático 2.....	81
3.5.2.1.	Local em estudo .....	81
3.5.2.2.	Aplicação do georadar.....	81
3.5.2.3.	Tratamento e análise de resultados.....	82
3.5.3.	Conclusões .....	83



3.6.	Aplicação ao caso de estudo da ponte de Vila Fria .....	84
3.6.1.	Local em estudo.....	84
3.6.2.	Aplicação do georadar .....	89
3.6.3.	Tratamento e análise de resultados .....	90
3.6.4.	Conclusões.....	96
4.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	98
4.1.	Conclusões gerais .....	98
4.2.	Perspectivas futuras .....	100
	Referências Bibliográficas.....	B-1
	Anexos.....	I-1
	Anexo I: Registo das Sondagens de Coimbra .....	I-1
	Anexo II: Sondagens do Instituto Politécnico de Tomar.....	II-4



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação do GPR numa zona de dunas (Moura <i>et al.</i> , 2006).....	5
Figura 2 – Aplicação do GPR numa coluna do Mosteiro dos Jerónimos (Lourenço <i>et al.</i> , 2007).....	6
Figura 3 – Aplicação do GPR na inspecção de pavimentos rodoviários (Geo NDT, 2008). 6	
Figura 4 – Utilização do GPR em vias férreas (GSSI b). ....	6
Figura 5 – Propagação das ondas electromagnéticas, adaptado de (Cassidy, 2008). ....	8
Figura 6 – Espectro electromagnético, adaptado de (Cassidy, 2008).....	8
Figura 7 – Relação entre a velocidade e a constante dieléctrica relativa, adaptado de (Yalçiner, 2009).....	11
Figura 8 – Lei de Snell, adaptado de (Serway, 1996).....	16
Figura 9 – Equipamento de GPR do Instituto Politécnico de Tomar. ....	17
Figura 10 – Modo de aquisição (a) e registo de resultados (b), adaptado de (Manual de Instruções, versão 1.4). ....	19
Figura 11 – Radargrama. ....	19
Figura 12 – Factores que conduzem à diminuição da intensidade de sinal, adaptado de (Reynolds, 2002 in Fernandes, 2006).....	20
Figura 13 – Perda de energia por espalhamento geométrico, adaptado de (Fernandes, 2006).....	21
Figura 14 – Método de reflexão, adaptado de (Cassidy, 2008). ....	24
Figura 15 – Método do ponto médio comum, adaptado de (Cassidy, 2008).....	24
Figura 16 – Reflexão e refração de grande ângulo, adaptado de (Cassidy, 2008).....	25
Figura 17 – Modo de tomografia utilizado num pilar de secção quadrada, adaptado de (Fernandes e Lourenço, 2007). ....	25
Figura 18 – Erro de <i>aliasing</i> , adaptado de (National Instruments, 2009). ....	26
Figura 19 – Frequência de amostragem adequada, adaptado de (National Instruments, 2009).....	27
Figura 20 – Software RAMAC GroundVision versão 1.4.5. ....	29
Figura 21 – Indicação do local de introdução da velocidade média no software. ....	30
Figura 22 – Localização das sondagens (1 a 3) e dos perfis (1 a 4), adaptado de (TecBIS, IPN). ....	33
Figura 23 – Realização do perfil 1 com a antena de 250 MHz. ....	34
Figura 24 – Interpretação do perfil 2. ....	35
Figura 25 – Localização de seixos de maiores dimensões. ....	36
Figura 26 – Local em estudo. ....	37
Figura 27 – Aplicação do GPR com a antena de 250 MHz.....	37
Figura 28 – Localização da zona em estudo e das sondagens S1 e S2, adaptado de (Google Maps, 2010). ....	37
Figura 29 – Localização perfis transversais (1 a 4) e longitudinais (5 a 8). ....	39
Figura 30 – Perfil 1.....	40
Figura 31 – Perfil 2.....	40
Figura 32 – Perfil 3.....	40
Figura 33 – Perfil 4.....	41
Figura 34 – Perfil 5.....	42
Figura 35 – Perfil 7.....	42

Figura 36 – Dispositivo schlumberger, adaptado de (Santos, 2006b). .....	43
Figura 37 – Dispositivo dipolo-dipolo, adaptado de (Santos, 2006b). .....	43
Figura 38 – Perfil com dispositivo “Schlumberger”. .....	44
Figura 39 – Perfil com dispositivo “Dipolo-Dipolo”. .....	45
Figura 40 – Local em estudo. ....	47
Figura 41 – Realização de um perfil transversal à via com a antena de 250 MHz. ....	47
Figura 42 – Estrutura do pavimento no centro da via (Projecto de execução do troço do IC9 – Sublanço Alburitel / Nó de Carregueiros). .....	47
Figura 43 – Tubagens sob a berma. ....	48
Figura 44 – Perfil transversal. ....	49
Figura 45 – Perfil longitudinal (entre 95 e 128 metros). ....	50
Figura 46 – Perfil transversal 1. ....	51
Figura 47 – Perfil transversal 2. ....	51
Figura 48 – Perfil transversal 3. ....	51
Figura 49 – Perfil transversal 4. ....	51
Figura 50 – Patologias existentes no local em estudo. ....	52
Figura 51 – Realização de um perfil transversal com a antena de 250 MHz. ....	52
Figura 52 – Camadas do pavimento e respectivas espessuras. ....	52
Figura 53 – Perfil 1. ....	54
Figura 54 – Perfil 2. ....	54
Figura 55 – Perfil 4. ....	55
Figura 56 – Perfil 5. ....	55
Figura 57 – Perfil 6. ....	55
Figura 58 – Zona A. ....	55
Figura 59 – Zona B. ....	55
Figura 60 – Localização das zonas (A e B) e das sondagens (S2 a S7), adaptado de (Google Maps, 2010). ....	56
Figura 61 – Estrutura do pavimento da zona A (Moreira, 1992). ....	56
Figura 62 – Estrutura do pavimento da zona B (Moreira, 1992). ....	57
Figura 63 – Trecho do perfil 1 (entre os 61 e os 67 metros) obtido na zona A. ....	58
Figura 64 – Perfil 2 adquirido na zona A. ....	58
Figura 65 – Troço do perfil longitudinal 3 (entre os 55 e os 62 metros) obtido na zona B. ....	59
Figura 66 – Bucha plástica (Figueiredo, 2009). ....	62
Figura 67 – Danos visíveis nas faces Norte e Sul da parede (Figueiredo, 2009). ....	62
Figura 68 – Aplicação do GPR na parede e localização da malha. ....	63
Figura 69 – Identificação e localização dos perfis realizados na face Sul da parede. ....	64
Figura 70 – Identificação e localização dos perfis realizados na face Norte da parede. ....	64
Figura 71 – Determinação do intervalo de tempo entre a superfície de aquisição e a superfície oposta (Perfil 11). ....	65
Figura 72 – Perfil 1. ....	66
Figura 73 – Perfil 2. ....	66
Figura 74 – Perfil 3. ....	66
Figura 75 – Perfil 22. ....	66
Figura 76 – Perfil 25. ....	66
Figura 77 – Perfil 26. ....	66
Figura 78 – Perfil 5. ....	67
Figura 79 – Perfil 5 após aplicação do filtro <i>background removal</i> . ....	67
Figura 80 – Perfil 13. ....	67

Figura 81 – Perfil 13 com aplicação do filtro <i>background removal</i> .....	67
Figura 82 – Localização do prego com bucha plástica na parede e na grelha (face Sul). ...	68
Figura 83 – Perfil 7.....	68
Figura 84 – Perfil 7 após aplicação do filtro <i>background removal</i> . ....	68
Figura 85 – Perfil 12.....	69
Figura 86 – Perfil 12 com o filtro <i>background removal</i> .....	69
Figura 87 – Perfil 18.....	69
Figura 88 – Perfil 18 com ajuste do filtro <i>time varying gain</i> e filtro <i>background removal</i> . 69	
Figura 89 – Face A. ....	70
Figura 90 – Face B. ....	70
Figura 91 – Aplicação do GPR na parede com a antena de 1,6 GHz. ....	71
Figura 92 – Localização da grelha na Face A e identificação dos perfis verticais (1 a 9) e horizontais (10 a 18). ....	71
Figura 93 – Chapa de metal colocada na face B da parede. ....	72
Figura 94 – Determinação do tempo necessário para o sinal atravessar a parede.....	73
Figura 95 – Perfil 2.....	74
Figura 96 – Zona de aplicação do GPR e espaçamento entre varões horizontais. ....	74
Figura 97 – Alinhamento das armaduras horizontais. ....	74
Figura 98 – Perfil 12 com a identificação do afastamento entre os varões verticais.....	75
Figura 99 – Alinhamento dos varões verticais. ....	76
Figura 100 – Laje de betão armado. ....	77
Figura 101 – Espessura da laje de betão armado.....	77
Figura 102 – Dimensões em planta da laje de betão armado. ....	78
Figura 103 – Grelha utilizada no estudo efectuado na laje.....	78
Figura 104 – Localização dos perfis verticais (1 a 5) e dos perfis horizontais (6 a 14). ....	79
Figura 105 – Perfil 2.....	80
Figura 106 – Perfil 11.....	80
Figura 107 – Local de aplicação do GPR. ....	81
Figura 108 – Localização dos perfis longitudinais (1 a 11) e transversais (12 a 22). ....	82
Figura 109 – Perfil vertical 9.....	83
Figura 110 – Perfil vertical 9 com aplicação dos filtros de ganho e <i>background removal</i> . 83	
Figura 111 – Perfil transversal 18. ....	83
Figura 112 – Perfil transversal 18, após aplicação dos filtros de ganho e <i>background removal</i> . ....	83
Figura 113 – Vista aérea da nova ponte de Vila Fria (Costa, 2007).....	85
Figura 114 – Vista da ponte de Vila Fria, do alçado montante (a) e do alçado jusante (b). 85	
Figura 115 – Tabuleiro da ponte. ....	86
Figura 116 – Aberturas da calha técnica (Costa, 2007).....	86
Figura 117 – Armário técnico.....	86
Figura 118 – Corte transversal da ponte (Costa <i>et al.</i> , 2001). ....	87
Figura 119 – Alçado montante da ponte de Vila Fria, adaptado de (Costa, C., 2009). ....	87
Figura 120 – Material de enchimento (Costa, 2007). ....	88
Figura 121 – Impermeabilização do tabuleiro (vista geral) (Costa, 2007). ....	89
Figura 122 – Perfis efectuados no tabuleiro da ponte, do lado jusante (a) e do lado montante (b).....	90
Figura 123 – Radargrama do perfil 1 (entre 21 e 28 m). ....	91
Figura 124 – Perfil 4 (entre os 10 e os 26 metros). ....	92
Figura 125 – Perfil 4 (entre os 26 e os 42 metros). ....	92

Figura 126 – Perfil 4 (entre os 13 e os 32 metros) com identificação dos arcos e das manchas atenuadas. ....	94
Figura 127 - Perfil 4 (entre os 24 e os 43 metros) com identificação dos arcos e das manchas atenuadas. ....	94
Figura 128 – Perfil 6 (entre 18 e 51 metros) obtido com a antena de 250 MHz.....	95
Figura 129 – Identificação da posição do centro do extradorso dos arcos, adaptado de (Costa <i>et. al</i> , 2001). ....	95

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da constante dielétrica relativa, condutividade eléctrica e velocidade de propagação da onda para vários materiais, adaptado de (Fernandes, 2006) e (Reynolds, 1997). .....	12
Tabela 2 – Profundidade do primeiro alvo detectado, resolução teórica e resolução prática para as antenas aplicadas. ....	15
Tabela 3 – Profundidade de penetração e resolução para diferentes frequências da antena, adaptado de (Fernandes e Lourenço, 2007) e (Cruz <i>et al.</i> , 2006).....	15
Tabela 4 – Valores de atenuação para diversos meios, adaptado de (Schon, 2004). ....	23
Tabela 5 – Separação da antena para cada frequência de antena da MALÅ Geoscience. ..	28
Tabela 6 – Parâmetros dos perfis efectuados.....	34
Tabela 7 – Parâmetros dos perfis realizados. ....	53
Tabela 8 – Dimensões dos elementos da ponte de Vila Fria (Costa, C., 2009).....	88
Tabela 9 – Parâmetros dos perfis efectuados.....	90
Tabela 10 – Posição do centro do extratorso dos arcos e percentagem de erro.....	96





## LISTA DE ABREVIATURAS

AGC	–	Automatic Gain Control
CMP	–	Common Mid-Point
CO	–	Common Offset
GSSI	–	Geophysical Survey Systems Inc.
GPS	–	Global Positioning System
GPR	–	Ground Penetrating Radar
IDS	–	Ingegneria dei Sistemi
IC	–	Itinerário Complementar
PVC	–	Policloreto de Vinilo
SEV	–	Sondagem Eléctrica Vertical
SPT	–	Standard Penetration Test
WARR	–	Wide Angle Reflection and Refraction



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta_1$	–	Ângulo de incidência
$\theta'_1$	–	Ângulo de reflexão
$\theta_2$	–	Ângulo de refração
Rx	–	Antena receptora
Tx	–	Antena transmissora
A	–	Área
$\alpha$	–	Coeficiente de atenuação
R	–	Coeficiente de reflexão
T	–	Coeficiente de transmissão
$\lambda$	–	Comprimento de onda
$\sigma$	–	Condutividade eléctrica
$\varepsilon_{r1}$	–	Constante dieléctrica relativa do meio 1
$\varepsilon_{r2}$	–	Constante dieléctrica relativa do meio 2
r	–	Distância à fonte / Raio da radiação
A e B	–	Eléctrodos de corrente
M e N	–	Eléctrodos de potencial
P	–	Factor de perda
W	–	Fonte de energia
$\omega$	–	Frequência angular
f	–	Frequência da onda
$f_s$	–	Frequência de amostragem
n	–	Índice de refração
$n_1$	–	Índice de refração do meio 1
$n_2$	–	Índice de refração do meio 2
I	–	Intensidade de energia
$f_{máx}$	–	Máxima frequência do sinal

$e$	–	Número de Neper
P1	–	Perfil 1
P2	–	Perfil 2
P3	–	Perfil 3
P4	–	Perfil 4
$\pi$	–	Período
$\mu$	–	Permeabilidade magnética
$\mu_0$	–	Permeabilidade magnética no vazio
$\mu_r$	–	Permeabilidade magnética relativa
$\varepsilon_0$	–	Permitividade eléctrica no vazio
$\varepsilon$	–	Permitividade eléctrica
$\varepsilon_1$	–	Permitividade eléctrica do meio 1
$\varepsilon_2$	–	Permitividade eléctrica do meio 2
$\varepsilon_r$	–	Permitividade eléctrica relativa / Constante dieléctrica relativa
$h$	–	Profundidade
$\delta$	–	Profundidade de pele
sin	–	Seno
S1	–	Sondagem 1
S2	–	Sondagem 2
S3	–	Sondagem 3
S4	–	Sondagem 4
S5	–	Sondagem 5
S6	–	Sondagem 6
S7	–	Sondagem 7
$t$	–	Tempo de ida e volta da onda
$\vec{E}$	–	Vector campo eléctrico
$\vec{H}$	–	Vector campo magnético
$v$	–	Velocidade
$c_0$	–	Velocidade das ondas electromagnéticas no vazio / Velocidade da luz no vazio

- $V_m$  – Velocidade de propagação das ondas electromagnéticas
- $v_1$  – Velocidade de propagação no meio 1
- $v_2$  – Velocidade de propagação no meio 2



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Considerações gerais**

As técnicas não destrutivas desempenham um papel fundamental ao permitirem investigar sem provocar danos. O georadar é um método não destrutivo de prospecção geofísica, que consiste na emissão e recepção de ondas electromagnéticas nos meios em investigação, materiais naturais e/ou artificiais (Fernandes, 2006).

Desde os últimos 30 anos que se verifica a aplicação do georadar no âmbito da prospecção geológica (Fernandes e Lourenço, 2007). Na década de 90 do passado século verificou-se a utilização desta técnica num grande leque de aplicações e também se registou um aperfeiçoamento ao nível do software para análise e processamento de dados (Cassidy, 2008).

Esta técnica além de ser utilizada em engenharia civil, também encontra aplicação ao nível do ambiente (Souza, 2005a), prospecção arqueológica (Grangeia e Matias, 2004), em minas (Monaghan *et al.*, 2005; Patterson, 2003), na detecção de infra-estruturas de redes (Fernandes *et al.*, 2008), em ciências forenses (Ruffell and McKinley, 2004) e no âmbito dos riscos naturais no gelo e na neve (Wuilloud, 2006).

O georadar beneficia da vantagem de poder ser aplicado em situações que impedem a utilização de meios pesados de prospecção directa ou mesmo de outros métodos de prospecção geofísica, como é o caso do interior de edifícios ou construções com determinadas características arquitectónicas (Benta *et al.*, 2008; David *et al.*, 2008). De acordo com Cruz *et al.* (2006), comparativamente a outras técnicas de ensaio destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas, o georadar proporciona custos inferiores.

## **1.2. Objectivos da dissertação**

A presente dissertação reúne um conjunto de aplicações do georadar em casos práticos de Engenharia Civil, com o intuito de estudar as potencialidades deste equipamento em diferentes utilizações, para que no futuro possa ser usado em situações reais.

Definido que está o objectivo geral, este será desdobrado em objectivos específicos que servirão de linha condutora de todo o trabalho:

- Estudar as potencialidades do equipamento existente no Instituto Politécnico de Tomar;
- Aplicar o georadar a situações relacionadas com Geologia e Pavimentos, e respectivo tratamento de dados e análise;
- Utilizar o georadar em situações relacionadas com Estruturas e respectivo tratamento de dados e análise.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação é constituída por quatro capítulos e encontra-se elaborada da forma que se passará a expor.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte e reúne a informação teórica sobre o tema com base na pesquisa bibliográfica efectuada. Contempla a indicação de alguns trabalhos desenvolvidos nas áreas da Geotecnia, Estruturas e Vias de Comunicação. Neste capítulo também serão abordados alguns aspectos teóricos, tais como, propagação das ondas electromagnéticas, descrição do equipamento de georadar e princípio de funcionamento, factores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal, aquisição e processamento dos dados, potencialidades e incertezas do método.

O terceiro capítulo é dedicado à aplicação do GPR em diferentes casos práticos de Engenharia Civil. Para cada um dos estudos práticos é indicado o local em estudo, o procedimento de aplicação do equipamento, e o tratamento e análise de resultados.

No quarto capítulo são referidas as principais conclusões deste trabalho e futuros desenvolvimentos.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Notas históricas

Em 1831 o físico e químico britânico Michael Faraday descobriu experimentalmente a indução electromagnética, tal descoberta levou à formulação da “lei da indução, de Faraday”, e posteriormente introduziu os conceitos de campo e de linhas de campo (Serway, 1996; E-escola, 2002). No mesmo ano, nos Estados Unidos da América, Joseph Henry realizou também experiências pioneiras de indução electromagnética (Serway, 1996).

O físico britânico James Clark Maxwell deu continuidade à pesquisa efectuada por Faraday no campo electromagnético e formula as leis do electromagnetismo (Serway, 1996; Caeiro *et al.*, 2000). As quatro equações de Maxwell, que constituem a base de todos os fenómenos eléctricos e magnéticos, estão presentes no seu célebre livro “Treatise on electricity and magnetism” (Serway, 1996; Caeiro *et al.*, 2000). Maxwell previu a existência de ondas electromagnéticas e constatou que a luz é uma forma de radiação electromagnética, confirmando teoricamente a sua velocidade (Serway, 1996).

Em 1887 o físico alemão Heinrich Hertz produziu e detectou experimentalmente ondas electromagnéticas em laboratório, a partir de campos eléctricos e magnéticos, confirmando desta forma as previsões de Maxwell (Serway, 1996; Villate, 1999).

Em 1904 o cientista alemão Christian Hülsmeyer utilizou sinais electromagnéticos para detectar objectos metálicos e para supervisionar o tráfego na água, nomeadamente para evitar a colisão entre navios (Hollmann, 2007; Daniels, 2007 in Costa, A., 2009).

Em 1929, W. Stern utilizou na Áustria o primeiro equipamento GPR para determinar a profundidade de um glaciar (Stern, 1929, 1930 in Olhoeft, 1999).

O físico escocês Robert Watson-Watt descobriu o radar que viria a ser extremamente útil na Segunda Guerra Mundial para defender a Grã-Bretanha contra o ataque aéreo alemão (National Library of Scotland, 2009).

No ano de 1967, o GPR foi utilizado pela primeira vez numa missão espacial em solo lunar (Apollo 17) e na guerra do Vietname pelo exército Americano, na detecção de túneis norte-Vietnamitas (Cassidy, 2008).

Em 1970 foi fundado GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.) líder mundial no desenvolvimento de sistemas de GPR, que em 1971 lançou no mercado o primeiro aparelho comercial de georadar e em 1974 vendeu o primeiro equipamento portátil (GSSI a).

Entretanto, também surgiram novas empresas comerciais de tecnologia GPR, tais como, MALÅ Geoscience, PENETRADAR Corporation, IDS- Ingegneria dei Sistemi, 3D-RADAR, Sensors & Software Inc., RADAR Systems Inc., entre outras.

A cada dois anos, é realizada uma conferência internacional dedicada ao GPR. Entre 15 a 19 de Junho de 2008 decorreu a “*12th International Conference on Ground Penetrating Radar*” na Universidade de Birmingham, no Reino Unido (European GPR Association, 2008) e entre 21 e 25 de Junho de 2010, teve lugar na Università del Salento, em Lecce, na Itália, a “*XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*” (Instituto IBAM, CNR).

## **2.2. Investigação Actual**

De seguida, serão mencionados alguns exemplos de aplicações do georadar nas áreas de Geotecnia, Estruturas e Vias de Comunicação.

No âmbito da Geotecnia, o GPR pode ser utilizado para localização de estruturas geológicas e pesquisa da respectiva profundidade (Benta *et al.*, 2008), adquirir dados relativos às características do solo (Queiroz *et al.*, 2007) e análise da estratigrafia (Gregory and Jol, 2007). O georadar também se utiliza na investigação de maciços de calcário para identificação de cavidades, zonas fracturadas e vazios (Cruz *et al.*, 2008) e na prospecção de rochas ornamentais (Guerreiro, 2000). Destaca-se ainda a aplicação deste equipamento na investigação da estabilidade de taludes (Aranha *et al.*, 2006), em estudos efectuados em áreas costeiras continentais (Gandolfo *et al.*, 2001) e em zonas com dunas (Figura 1) (Moura *et al.*, 2006).



Figura 1 – Aplicação do GPR numa zona de dunas (Moura *et al.*, 2006).

Na área de Estruturas, o GPR pode ser aplicado no betão armado para verificar a homogeneidade, a presença de defeitos, tal como, localizar e determinar o número de varões de aço (Barrile and Pucinotti, 2005). Verifica-se a utilização do georadar na identificação de varões de armadura ordinária a profundidades elevadas, baínhas de pré-esforço e barras pré-esforçadas (Fernandes e Lourenço, 2007). Em estrutura de betão, este equipamento também se utiliza no controlo de qualidade, detecção de elementos não metálicos presentes no seu interior e identificação de cavidades e vazios (Spoerer, 2009). De salientar, a aplicação do georadar em edifícios (Bavusi *et al.*, 2008), análise de estruturas históricas e estruturas antigas (Fernandes, 2006), construções históricas em alvenaria (Fernandes, 2010) e monumentos históricos (Figura 2) (Fernandes *et al.*, 2006; Lourenço *et al.*, 2007). O GPR tem também utilização em pontes de betão armado (Cruz *et al.*, 2006), pontes ferroviárias em arco de alvenaria (Orbán and Gutermann, 2009) e pontes históricas (Lubowiecka *et al.*, 2009).



Figura 2 – Aplicação do GPR numa coluna do Mosteiro dos Jerónimos (Lourenço *et al.*, 2007).

No âmbito das Vias de Comunicação, destaca-se a utilização do GPR em pavimentos rodoviários para caracterização (Costa, A., 2009) e determinação da espessura dos estratos constituintes (Al-Qadi and Lahouar, 2005) (Figura 3), e em vias férreas (Figura 4) (Fortunato, 2005).



Figura 3 – Aplicação do GPR na inspeção de pavimentos rodoviários (Geo NDT, 2008).



Figura 4 – Utilização do GPR em vias férreas (GSSI b).

## 2.3. Fundamentos teóricos

### 2.3.1. Propagação das ondas electromagnéticas

“As ondas electromagnéticas são geradas pela aceleração de cargas eléctricas”, “transportam energia e momento de uma certa fonte para um receptor” e propagam-se “no vácuo com a velocidade da luz”  $c_0$  (Serway, 1996).

A velocidade das ondas electromagnéticas no vazio  $c_0$ , pode ser calculada pela equação (1):

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

Sendo,  $c_0$  a velocidade da luz no vazio ( $c_0 = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ),  $\epsilon_0$  a permissividade eléctrica no vazio ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ ) e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vazio ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ ).

Em 1983, na 17ª Conferência Geral dos Pesos e Medidas, a qual teve lugar em Paris, estabeleceu-se o valor de  $c_0 = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  para a velocidade da luz no vazio (Hecht, 2002), no entanto, habitualmente aproxima-se para  $c_0 = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

A Figura 5 refere-se à forma de propagação das ondas electromagnéticas. Estas “são de natureza transversal”, “constituídas por campos eléctrico e magnético oscilantes”, “perpendiculares um ao outro e também perpendiculares à direcção de propagação da onda” (Serway, 1996). Nesta figura, os campos eléctrico e magnético representam-se, respectivamente pelos vectores  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ . O comprimento de onda  $\lambda$ , identificado na mesma figura, pode ser determinado pelo quociente entre a velocidade da luz no vazio  $c_0$ , e a frequência da onda  $f$ , através da equação (2):

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (2)$$

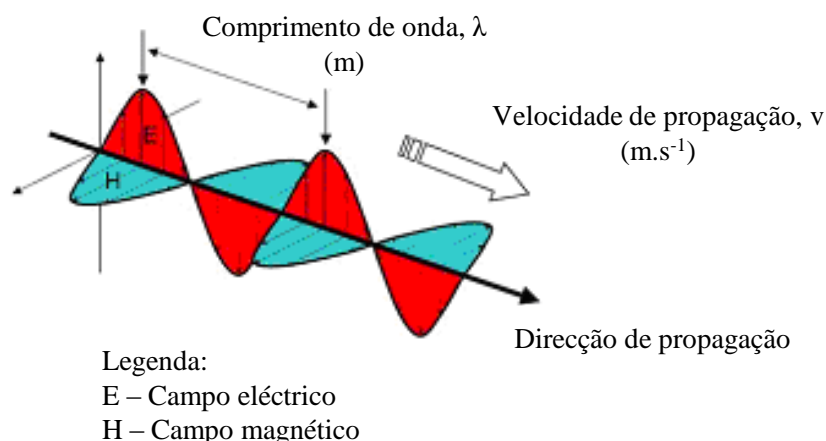


Figura 5 – Propagação das ondas electromagnéticas, adaptado de (Cassidy, 2008).

Na Figura 6 encontra-se representado o espectro electromagnético, no qual a frequência e o comprimento de onda definem os vários tipos de radiação electromagnética, particularmente, ondas de rádio, microondas, infravermelhos, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama (Serway, 1996). A banda de frequência que corresponde ao radar localiza-se entre os 10 aos 2000 MHz (Fernandes e Lourenço, 2007).

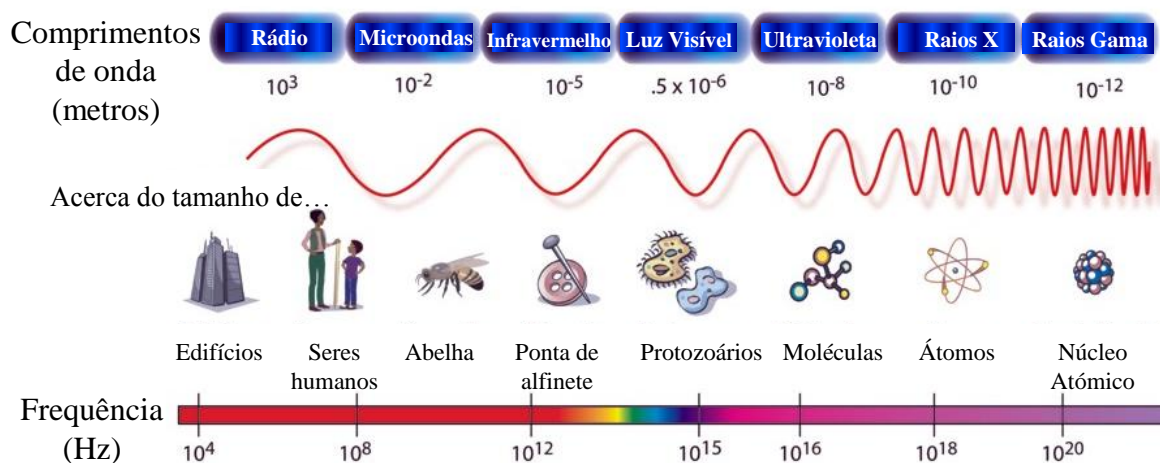


Figura 6 – Espectro electromagnético, adaptado de (Cassidy, 2008).

### 2.3.2. Propriedades electromagnéticas do material

As propriedades electromagnéticas de um meio material incluem a condutividade eléctrica  $\sigma$ , a permitividade eléctrica  $\varepsilon$ , e a permeabilidade magnética  $\mu$ , (Ulaby, 2007) as quais são determinantes na forma como as ondas electromagnéticas se propagam.

#### 2.3.2.1. Condutividade eléctrica

Consoante os módulos das respectivas condutividades, os diversos materiais são considerados como condutores ou isolantes, estes também denominados por dieléctricos (Ulaby, 2007). Os materiais condutores têm número elevado de electrões livres nas últimas camadas dos átomos, que se podem deslocar para um átomo próximo, criando uma corrente, sob a acção de um campo eléctrico externo (Ulaby, 2007). Por outro lado, os dieléctricos são materiais não condutores uma vez que todos os electrões das camadas externas se encontram fortemente ligados aos seus átomos ou às suas moléculas e como tal, não existem electrões livres que permitam a condução o que torna estes materiais resistentes à passagem de corrente eléctrica (Villate, 1999). Os materiais semicondutores têm valores intermédios de resistividade entre os materiais isolantes e os condutores (Serway, 1996).

A grande maioria dos minerais constituintes das rochas e dos materiais presentes no subsolo são considerados isolantes, com excepção dos minerais metálicos, como exemplo, o cobre (Cu), o ferro (Fe), o zinco (Zn), a prata (Ag) e também com excepção das argilas (Aguilar, 2005). Na maior parte das rochas e subsolos predomina a condução electrolítica, cujos condutores eléctricos são os iões que derivam da dissociação de sais devido à dissolução destes na água (Aguilar, 2005; Luís, 2005a). Os iões movimentam-se através do líquido intersticial e quanto mais estiverem presentes em solução maior é a condutividade (Luís, 2005a). As águas intersticiais são soluções de sais minerais onde predomina o cloreto de sódio (NaCl), o qual provoca o aumento da condutividade eléctrica (Miranda *et al*; Luís, 2005a).

De acordo com Luís (2005a), a condutividade é condicionada também pela porosidade, sendo que, quanto maior for este parâmetro, maior poderá ser o número de iões dissolvidos no líquido intersticial, no entanto, é essencial que os vários poros estejam

interconectados para que a corrente eléctrica possa circular ao longo das rochas. Nas areias e argila (porosidade intergranular) e também no basalto (porosidade não comunicante) a porosidade designa-se por primária, a qual surge durante a formação da rocha (Costa e Lança, 2001). Por outro lado, nos granitos e gnaisses (porosidade de fissuras), tal como nos calcários, dolomitos e rochas carbonatadas (porosidade de canais) a porosidade ocorre depois da formação da rocha, classificando-se como secundária (Costa e Lança, 2001).

Os minerais de argila além de terem dimensões reduzidas apresentam uma forma lamelar, o que lhes confere enormes superfícies específicas (Fernandes, 1994). Estes minerais apresentam cargas negativas nas suas faces e algumas cargas positivas nos bordos o que permite o desenvolvimento de reacções químicas com a água e com os sais que nela se encontram dissolvidos (Fernandes, 1994). Sendo assim, verifica-se a presença de água adsorvida ligada à superfície de cada partícula e também de uma camada difusa constituída pelos iões que estão mais fracamente ligados à argila e que têm a liberdade de se mover perante a acção de um campo eléctrico exterior (Luís, 2005a). Com efeito, os solos argilosos saturados de água apresentam elevada condutividade.

Posto isto, nas rochas e subsolos, quanto maior for a presença de minerais metálicos, o teor em água, a quantidade de iões dissolvidos e de cloreto de sódio (NaCl), a porosidade do meio (desde que haja interconexão dos vários poros) e o conteúdo em argila, maior será a condutividade eléctrica.

Nas rochas a condutividade depende igualmente “da condutividade eléctrica da matriz, da porosidade, da textura e distribuição dos poros, da condutividade eléctrica do fluido intersticial, da quantidade de fluido intersticial bem como dos processos que ocorrem nas superfícies de contacto entre a matriz rochosa e as fases fluidas” (Santos, 2006a).

Os valores de condutividade eléctrica para vários materiais estão indicados na Tabela 1.

#### **2.3.2.2. Permittividade eléctrica**

A permissividade é uma propriedade eléctrica que “traduz o comportamento eléctrico do meio” e pode ser definida como “uma medida do grau de permeabilidade do material ao campo eléctrico em que está imerso” (Hecht, 2002).



A permitividade eléctrica relativa  $\varepsilon_r$ , em relação à permitividade eléctrica no vazio  $\varepsilon_0$ , pode ser obtida através da equação (3) (Ulaby, 2007):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

A permitividade eléctrica relativa normalmente é também designada por constante dieléctrica relativa e caracteriza os materiais dieléctricos. A constante dieléctrica relativa condiciona a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas, sendo assim um aumento no valor desta constante resulta numa diminuição na velocidade de propagação (Cassidy, 2008). Este facto pode ser observado no gráfico da Figura 7 onde se constata a relação destas duas grandezas.

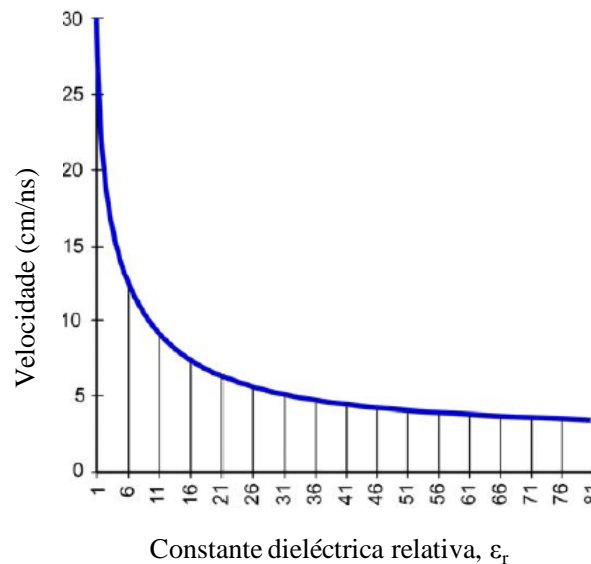


Figura 7 – Relação entre a velocidade e a constante dieléctrica relativa, adaptado de (Yalçiner, 2009).

Com efeito, em ambientes molhados ou nos materiais que apresentam elevada humidade, verifica-se uma diminuição da velocidade de propagação devido à presença de água, a qual possui uma constante dieléctrica relativa elevada ( $\varepsilon_r = 81$ ), como se pode verificar na Tabela 1.

A Tabela 1 indica a constante dielétrica relativa, a condutividade eléctrica e a velocidade de propagação da onda para vários materiais.

Tabela 1 – Valores da constante dielétrica relativa, condutividade eléctrica e velocidade de propagação da onda para vários materiais, adaptado de (Fernandes, 2006) e (Reynolds, 1997).

Material		Constante dielétrica relativa, $\epsilon_r$	Condutividade eléctrica, $\sigma$ ( $\text{S.m}^{-1}$ )	Velocidade de propagação da onda $\times 10^8 (\text{m.s}^{-1})$
Ar		1	0	3,00
Água doce		81	0,001	0,33
Água do mar		81	4	0,33
Areia	seco	3-6	$10^{-6}$ -0,001	1,20-1,70
	molhado	25-30	0,001-0,01	0,55-0,60
Solo argiloso	seco	3	0,001-0,01	1,73
	molhado	8-15	1-10	0,70-1,10
Granito	seco	4-5	$10^{-7}$	1,20-1,50
	molhado	7-8	0,001	1,06-1,12
Calcário		7-9	-	1,00-1,13
Betão	seco	4-6	0,001	1,30
	molhado	11-12	0,01-0,05	0,90
Asfalto		3-5	-	1,34-1,73
PVC, epóxidos, poliéster		3	-	1,73

### 2.3.2.3. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética  $\mu$ , é definida de acordo a equação (4) (Hammond, 1997):

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad (4)$$

Onde  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa (Hammond, 1997).

“Os materiais diamagnéticos são constituídos por átomos que não têm momentos magnéticos permanentes” (Serway, 1996). A maior parte das substâncias são diamagnéticas, como é o caso da água, grafite, mármore, quartzo, feldspatos, vidro, plástico e muitos compostos orgânicos (Villate, 1999; Miranda).

Os materiais paramagnéticos, tal como o alumínio, sódio, platina, piroxena, olivina, biotite e anfíbolite, possuem momentos magnéticos permanentes (Villate, 1999; Miranda). Os átomos dos materiais ferromagnéticos possuem também momentos magnéticos

permanentes, a título de exemplo refira-se substâncias tais como o ferro, o cobalto e o níquel (Serway, 1996).

De acordo com Fernandes (2006), nos materiais geológicos e de construção usais, o valor da permeabilidade magnética é igual ao valor da permeabilidade magnética no vácuo. No subsolo esta propriedade tem um efeito insignificante nas ondas emitidas pelo georadar e apenas se torna relevantes quando estão presentes grandes quantidades de substâncias magnéticas, sendo que neste caso, a velocidade da onda de GPR é afectada (Cassidy, 2008). São disso exemplo, a magnetite e o óxido de ferro (Cassidy, 2008).

### 2.3.3. Velocidade de propagação das ondas electromagnéticas

As ondas electromagnéticas propagam-se no ar e no vazio à velocidade da luz (Serway, 1996), por outro lado, nos materiais a velocidade de propagação de uma onda electromagnética pode ser obtida por meio da equação (5), adaptada de (Luís, 2005b):

$$V_m = \frac{c_0}{\left\{ \left( \frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \right) \left[ (1 + P^2) + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Sendo  $P$  o factor de perda ( $P = \sigma / \omega \epsilon$ ), onde  $\omega$  é a frequência angular (Luís, 2005b).

Porém, a expressão (5) pode ser simplificada. Assim, nos materiais não magnéticos a permeabilidade magnética relativa é igual à unidade (Luís, 2005b). Quando as ondas electromagnéticas emitidas pelo georadar se propagam em materiais com condutividade  $\sigma$ , muito baixa ou próxima de zero, o factor de perda  $P$ , é considerado nulo (Fernandes, 2006). Assim sendo, nestes materiais a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas pode ser obtida pela seguinte expressão (6), adaptada de (Luís, 2005b):

$$V_m = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

### 2.3.4. Profundidade de penetração e resolução

A profundidade de penetração depende da frequência da antena, do respectivo comprimento de onda e das propriedades eléctricas nomeadamente, condutividade eléctrica e constante dieléctrica relativa (Júnior, 2001).

De acordo com Cruz *et al.* (2006), as antenas de elevada frequência atingem menores profundidades de penetração mas permitem obter uma maior precisão e resolução, por outro lado, as antenas de menor frequência, embora possuam uma menor precisão e resolução garantem uma maior profundidade de penetração. A escolha da frequência da antena a utilizar num determinado trabalho depende da aplicação a realizar, do tamanho e forma dos objectos em estudo, das propriedades do meio de intervenção, das características da superfície, da profundidade que se deseja alcançar, da precisão ou resolução pretendidas (Cruz *et al.*, 2006; Yalçiner, 2009).

Segundo (Clark, 2004 in Fernandes, 2006), quanto maior for a condutividade eléctrica do material, maior será a atenuação e consequentemente a profundidade de penetração será menor.

De acordo com (Forde, 2004 in Fernandes, 2006), deve considerar-se o valor de  $\lambda/3$  para a profundidade dos primeiros alvos a serem detectados.

A resolução além de depender da frequência da antena, é também influenciada por alguns factores que condicionam a “qualidade da resolução”, tais como, materiais heterogéneos, elementos metálicos, materiais saturados de água, materiais ricos em argila e solos argilosos (ambos saturados de água), materiais com índice ferromagnético elevado (Topczewski, 2007) e ainda pela orientação dos objectos como é o caso de interfaces inclinadas. Em zonas onde foram efectuadas escavações observa-se uma falha de contraste em termos de resolução, devido ao facto de haver uma mistura de solos e como tal, semelhança ao nível das suas propriedades.

Segundo (Padaratz and Forde, 1995 in Fernandes, 2006), se as condições de propagação forem favoráveis, um determinado objecto é resolúvel, se as suas dimensões forem superiores a  $\lambda/4$  (resolução teórica). De acordo com (Forde, 2004 in Fernandes, 2006), pode considerar-se a resolução de  $\lambda/2$  (resolução prática) quando se pretende escolher a antena a utilizar para um determinado estudo.

Neste contexto, a Tabela 2 indica para cada uma das antenas utilizadas neste trabalho, a profundidade dos primeiros alvos a serem detectados, a resolução teórica e a resolução prática.

Tabela 2 – Profundidade do primeiro alvo detectado, resolução teórica e resolução prática para as antenas aplicadas.

Frequência central da antena (MHz)	$\lambda/3$	$\lambda/4$	$\lambda/2$
250	40,00 cm	30,00 cm	60,00 cm
500	20,00 cm	15,00 cm	30,00 cm
800	12,50 cm	9,38 cm	18,75 cm
1600	6,25 cm	4,69 cm	9,38 cm

A Tabela 3 reúne alguns valores típicos da profundidade de penetração e resolução para diferentes frequências da antena.

Tabela 3 – Profundidade de penetração e resolução para diferentes frequências da antena, adaptado de (Fernandes e Lourenço, 2007) e (Cruz *et al.*, 2006).

Frequência central da antena (MHz)	Profundidade de penetração (m)	Resolução
200	2 a 7	Baixa/Média
250	2 a 7	Média/Baixa
500	1 a 4	Média/Alta
800	0,5 a 2	Média/Alta
1600	0,5	Alta

Em aplicações no âmbito da Geotecnia habitualmente utilizam-se antenas de baixa frequência para alcançar uma maior profundidade, por outro lado em utilizações direccionadas para Engenharia Estrutural e Pavimentos é habitual utilizar antenas com elevada frequência de modo a obter uma maior precisão (Cruz *et al.*, 2006).

### 2.3.5. Coeficientes de reflexão e transmissão

Na Figura 8 estão representados dois meios adjacentes 1 e 2, sendo a camada 2 mais profunda do que a camada 1. Estes meios possuem constantes dieléctricas relativas ( $\epsilon_{r1}$  e  $\epsilon_{r2}$ ), velocidades de propagação ( $v_1$  e  $v_2$ ) e índices de refacção distintos ( $n_1$  e  $n_2$ ). Nesta figura, os raios incidente, reflectido e refractado e a direcção normal à interface são coplanares (Serway, 1996).

Como se pode verificar, o ângulo de reflexão ( $\theta'_1$ ) é igual ao ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) da onda, de acordo com a Lei da Reflexão (7) (Serway, 1996):

$$\theta'_1 = \theta_1 \quad (7)$$

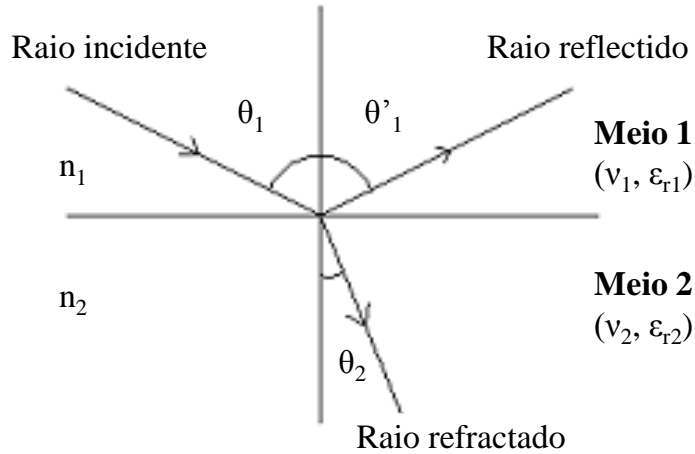


Figura 8 – Lei de Snell, adaptado de (Serway, 1996).

O índice de refração é definido pela razão de velocidades entre dois meios. No caso das ondas electromagnéticas, o meio de referência é o vácuo, sendo  $v$  a velocidade da luz num meio, obtém-se este índice através da equação (8), adaptada de (Serway, 1996).

$$n = \frac{c_0}{v} \quad (8)$$

Segundo a Lei da Refracção (também conhecida como a Lei de Snell), quando uma onda atravessa, a interface entre dois meios com índices de refração distintos, verifica-se a seguinte relação (9), sendo  $\theta_2$  o ângulo de refração (Vieira, 2002).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (9)$$

A relação anterior pode ser obtida em função da velocidade e da constante dieléctrica relativa de cada material, respectivamente por cada uma das expressões (10) e (11), adaptadas de (Fernandes, 2006):

$$v_2 \sin \theta_1 = v_1 \sin \theta_2 \quad (10)$$

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2 \quad (11)$$

Assumindo que os meios 1 e 2 (Figura 8) constituem duas camadas isotrópicas, horizontais e paralelas, com superfície plana, e considerando que não existem perdas significativas, o coeficiente de reflexão ( $R$ ) e o coeficiente de transmissão ( $T$ ) podem ser obtidos, respectivamente, por meio das equações (12) e (13) (Clemeña, 1991; McCvitt, 1993; in Fernandes, 2006):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (12)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (13)$$

## 2.4. Descrição e princípio de funcionamento do GPR

### 2.4.1. Equipamento GPR

Na Figura 9 pode ver-se o equipamento de GPR do Instituto Politécnico de Tomar, RAMAR/GPR da MALÀ Geoscience. Este é constituído por uma unidade de controlo, uma ou mais antenas, unidade de configuração e visualização, carrinho com dispositivo de posicionamento espacial (odómetro) e sistema de energia constituído por baterias e cabos de comunicação entre as várias unidades (fibras ópticas, etc.).

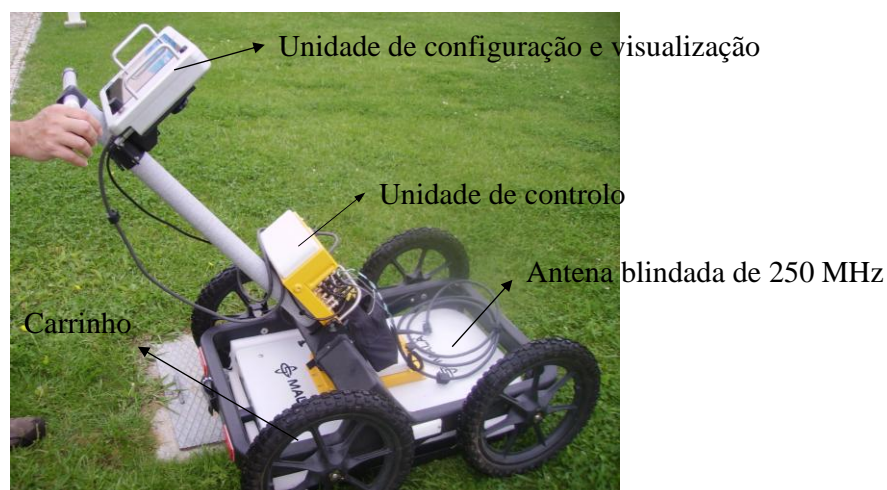


Figura 9 – Equipamento de GPR do Instituto Politécnico de Tomar.

A unidade de controlo representa a componente principal deste sistema, cuja função consiste em controlar, gerar e configurar o sinal, permitindo assim orientar a emissão e a recepção da energia electromagnética e armazenar os dados adquiridos na sua memória (Fernandes e Lourenço, 2007; Manual de Instruções, versão 1.0). A unidade de controlo envia para a antena transmissora (Tx) os impulsos eléctricos, e esta transforma-os em ondas electromagnéticas de curta duração que são emitidas através do meio, com frequência correspondente à antena utilizada, por sua vez, a energia reflectida é captada pela antena receptora (Rx) que envia os impulsos eléctricos à unidade de controlo (Aguiar, 2005). A unidade de configuração e visualização permite efectuar em campo algumas funções em tempo real, tais como, visualizar e processar dados e definir determinados parâmetros de ensaio (Cruz *et al.*, 2006). O carrinho que permite deslocar manualmente o equipamento GPR possui, ligado a uma das rodas traseiras, um dispositivo de posicionamento constituído por um odómetro digital que permite calibrar e visualizar a distância percorrida (Souza, 2005b). É de salientar que o dispositivo de posicionamento também pode ser um GPS, sendo que, esta disposição permite localizar em termos de coordenadas o local de investigação.

Para aquisição dos dados podem ser utilizadas uma ou várias antenas em simultâneo, de determinada frequência consoante o objectivo da investigação, as quais podem ser ou não blindadas. As antenas blindadas evitam o risco de radiação, são protegidas relativamente a interferências externas provenientes de elementos existentes no meio envolvente, diminuem os efeitos do ruído na investigação e impedem que o sinal seja emitido para cima e interfira nos sistemas de telecomunicações e telemóveis (Fernandes, 2006).

#### 2.4.2. Modo de funcionamento

O GPR emite ondas electromagnéticas de grande energia e alta frequência, que ao propagarem-se através de um meio e encontrando interfaces entre materiais ou objectos com distintas propriedades electromagnéticas, sofrem fenómenos de reflexão (Figura 10. a)), refacção e difracção (Fernandes, 2006). As reflexões são detectadas e registadas pela antena obtendo-se um registo contínuo de sinais ao longo de um perfil (Sousa *et al.*, 2000) (Figura 10. b)).



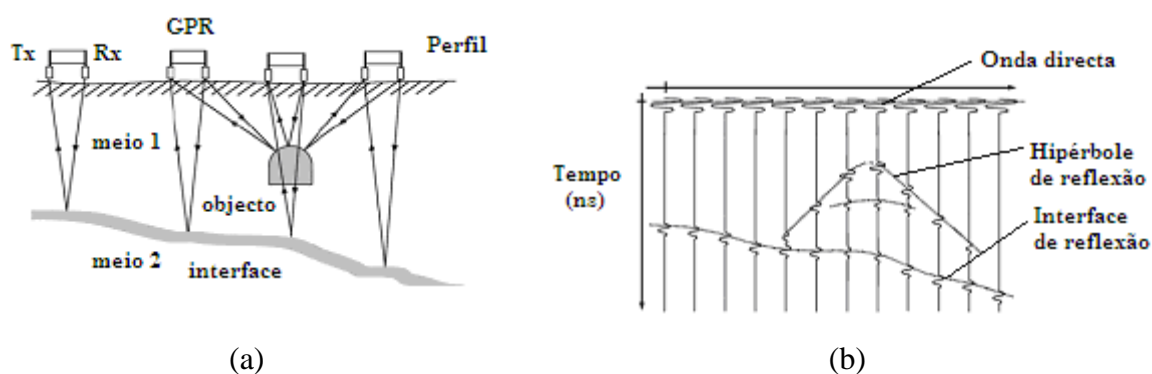


Figura 10 – Modo de aquisição (a) e registo de resultados (b), adaptado de (Manual de Instruções, versão 1.4).

Os resultados são apresentados através de radargramas, os quais resultam do conjunto ordenado dos vários traços, constituindo imagens gráficas bidimensionais de tempo versus distância (Cruz *et al.*, 2006) (Figura 11). A título de exemplo, na Figura 11 pode ver-se um radargrama efectuado na vertical de uma parede, no qual podem ser observadas dez hipérboles que representam as armaduras horizontais.

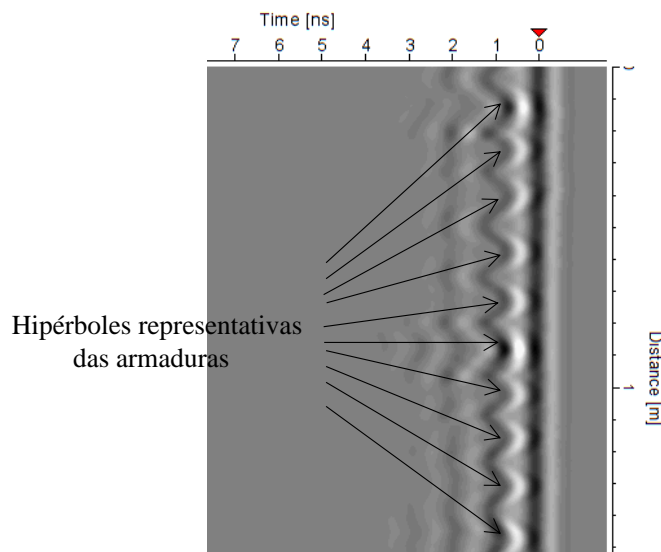


Figura 11 – Radargrama.

Durante a aquisição dos dados é possível visualizar os resultados adquiridos, contudo para obter uma correcta interpretação dos mesmos é necessário efectuar o processamento

dos radargramas através da utilização de software apropriado, diminuindo o mais possível o ruído e evidenciando os sinais de interesse (Aguiar, 2005). Através de software adequado é possível obter uma visualização 3D, dos resultados, por meio da junção de vários radargramas obtidos ao longo de perfis paralelos e cruzados.

## 2.5. Factores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal

Na Figura 12 estão representados os factores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal, nomeadamente, eficiência do equipamento e funcionamento de todos os seus componentes electrónicos, acoplamento da antena à superfície de investigação, absorção, propagação geométrica, dispersão, atenuação, reflexão e transmissão.

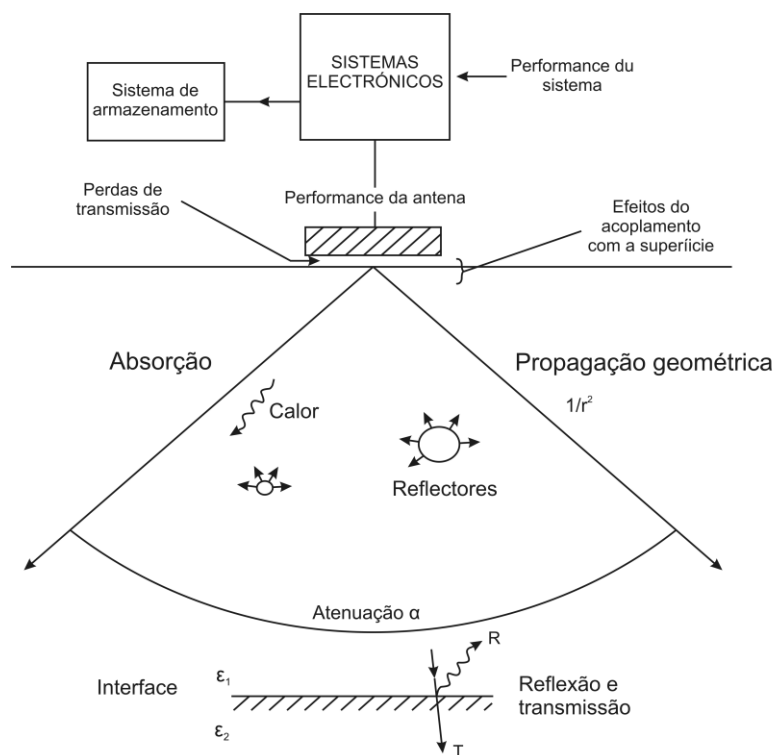


Figura 12 – Factores que conduzem à diminuição da intensidade de sinal, adaptado de (Reynolds, 2002 in Fernandes, 2006).

### 2.5.1. Equipamento e acoplamento da antena à superfície de investigação

A eficiência do equipamento e o bom funcionamento de todos os seus componentes electrónicos são importantes para evitar as perdas de energia (Fernandes, 2006). As antenas devem ser deslocadas paralelamente à superfície de investigação e directamente sobre a

mesma para que se verifique um correcto acoplamento da antena, evitando assim as perdas de energia electromagnética entre o ar e a respectiva superfície (Cassidy, 2008).

### 2.5.2. Absorção

A absorção verifica-se em materiais condutores ou em materiais em que um dos componentes tem condutividade eléctrica elevada (Fernandes, 2006), quando a energia das ondas electromagnéticas é convertida em energia térmica pelo efeito de Joule (Clark, 2004 in Fernandes, 2006).

### 2.5.3. Espalhamento geométrico

A energia emitida pelo GPR poder ser perdida devido ao espalhamento geométrico em forma de cone (Figura 13), com um ângulo compreendido aproximadamente entre 30° e 45° (Fernandes, 2006). Este fenómeno ocorre numa área cada vez maior à medida que a profundidade ou a distância à fonte aumentam, verificando-se a redução da intensidade da energia num factor de  $(1/\text{distância}^2)$  (Fernandes, 2006).

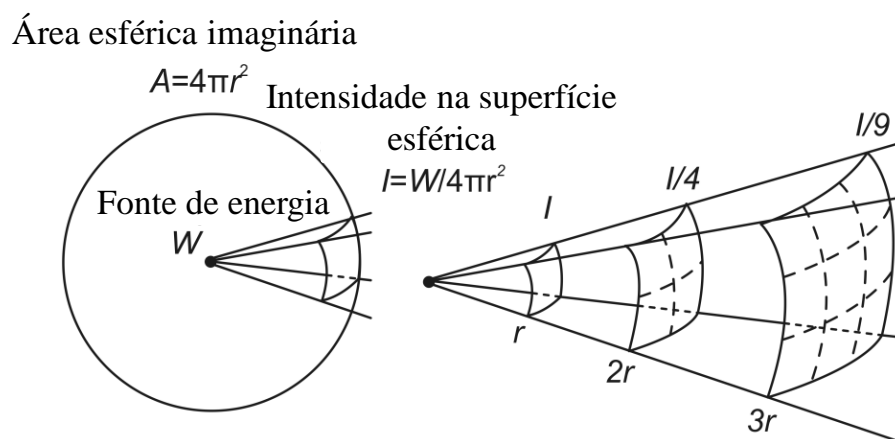


Figura 13 – Perda de energia por espalhamento geométrico, adaptado de (Fernandes, 2006).

Na Figura 13, “ $r$ ” representa a distância à fonte e o raio da radiação adoptando um modelo esférico (Fernandes, 2006). O facto de a energia ser transmitida desta forma pode provocar reflexões em objectos enterrados em torno do local de passagem da antena.

#### 2.5.4. Dispersão

A dispersão de energia electromagnética ocorre quando as ondas do GPR incidem sobre objectos com dimensões da ordem do seu comprimento de onda ou dimensões inferiores, tais como, cascalho, material de entulho, entre outros, verificando-se uma dispersão aleatória da energia incidente (Aguilar, 2005; Cassidy, 2008).

#### 2.5.5. Atenuação

A atenuação depende das propriedades electromagnéticas do meio através do qual as ondas se propagam (como se pode constatar pela expressão (14)) e também da frequência da antena (Fernandes, 2006).

Como já foi referido anteriormente, quanto maior for a condutividade, maior será a atenuação (Clark, 2004 in Fernandes, 2006). A título de exemplo, nas argilas como consequência da sua elevada condutividade eléctrica, verifica-se um efeito de atenuação do sinal electromagnético, enquanto que a areia seca possui uma baixa condutividade e mantém a atenuação aproximadamente constante para uma grande gama de frequências (Júnior, 2001).

O coeficiente de atenuação  $\alpha$ , pode ser determinado pela expressão (14) (Cassidy, 2008):

$$\alpha(\omega) = 8,686\omega \sqrt{\left[ \frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right)^2} - 1 \right) \right]} \quad (14)$$

O coeficiente de atenuação é inversamente proporcional à profundidade de péle  $\delta$  (Luís, 2005b). Este parâmetro representa a profundidade para a qual a amplitude diminui para um valor  $1/e$ , isto é,  $\cong 37\%$  do valor que tinha inicialmente, sendo “ $e$ ” o número de Neper (Luís, 2005b).

A Tabela 4 indica os valores de atenuação para alguns meios distintos.

Tabela 4 – Valores de atenuação para diversos meios, adaptado de (Schon, 2004).

Meio	Atenuação (dB.m <sup>-1</sup> )
Ar	0
Areia seca	0,01
Areia saturada de água	0,03...0,3
Argila	1...300
Água (doce)	0,1
Água (salgada)	1000

### 2.5.6. Reflexão e transmissão

Quando as ondas electromagnéticas incidem sobre interfaces de materiais com propriedades eléctricas e magnéticas distintas, e velocidades diferentes, parte da energia é reflectida na interface e outra parte é refractada no segundo material, verificando-se perdas de energia, excepto no caso de metais puros (Cassidy, 2008).

## 2.6. Aquisição de dados

### 2.6.1. Métodos de aquisição de dados

De acordo com a finalidade do estudo, os dados de GPR podem ser adquiridos por meio de alguns métodos distintos, tais como, modo de reflexão ou *Common Offset* (CO), ponto médio comum ou *Common Mid-Point* (CMP), reflexão e refacção de grande ângulo ou *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR) e tomografia.

#### 2.6.1.1. Reflexão

Dos métodos mencionados o mais comum e também o mais utilizado é o de reflexão (Figura 14), este permite analisar extensas áreas uma vez que os dados podem ser adquiridos de forma rápida e simples (Fernandes, 2006). Segundo (Fernandes, 2006), este método consiste em deslocar uma ou duas antenas ao longo de um perfil, com distância fixa entre as antenas emissora e receptora.

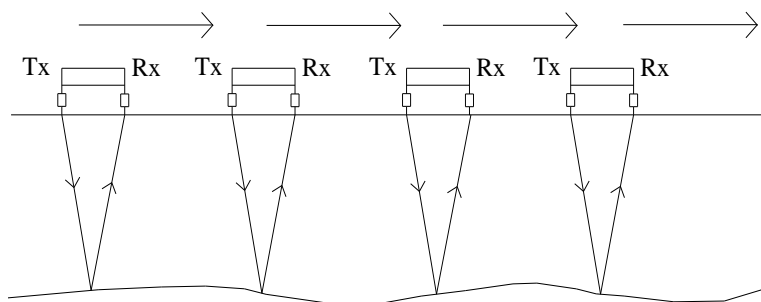


Figura 14 – Método de reflexão, adaptado de (Cassidy, 2008).

#### 2.6.1.2. Ponto médio comum

No método do ponto médio comum (Figura 15) a distância entre as antenas emissora e receptora é incrementada em sentidos opostos, ao longo do perfil, partindo de uma posição comum fixa e localizada ao centro, ou seja do ponto médio comum (Borges *et al.*, 2006).

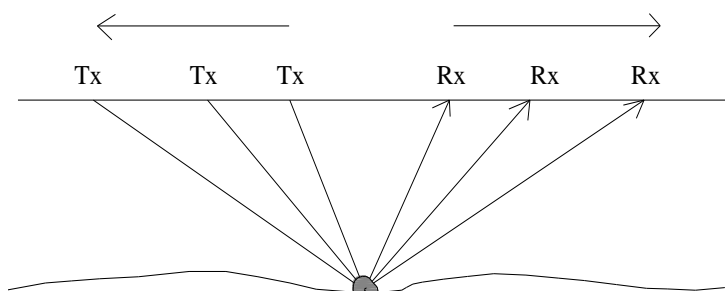


Figura 15 – Método do ponto médio comum, adaptado de (Cassidy, 2008).

#### 2.6.1.3. Reflexão e refração de grande ângulo

Como se pode observar na Figura 16, no método de reflexão e refração de grande ângulo, a antena emissora (Tx) permanece na mesma posição, enquanto que a antena receptora (Rx) vai sendo progressivamente afastada, levando ao aumento da separação entre as duas (Cassidy, 2008; Borges *et al.*, 2006).

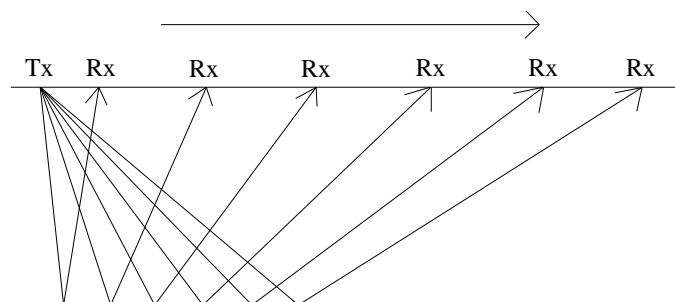


Figura 16 – Reflexão e refração de grande ângulo, adaptado de (Cassidy, 2008).

#### 2.6.1.4. Tomografia

No modo tomografia (Figura 17) as antenas emissora e receptora vão ocupando sucessivamente diferentes posições conhecidas e a distância entre as mesmas vai sendo alterada, assim, para cada localização do emissor (Tx) o receptor (Rx) é movido para diferentes colocações (Fernandes e Lourenço, 2007). Esta técnica permite cruzar a aquisição de dados entre o emissor e o receptor e deste modo estudar integralmente uma determinada área (Manual de Instruções, versão 1.0).

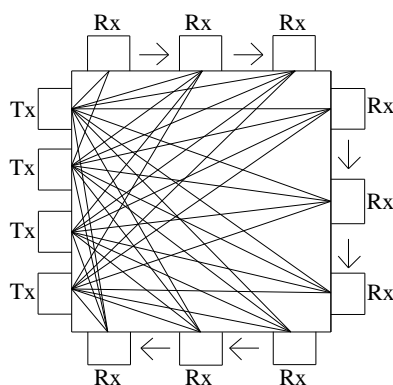


Figura 17 – Modo de tomografia utilizado num pilar de secção quadrada, adaptado de (Fernandes e Lourenço, 2007).

## 2.6.2. Parâmetros de aquisição

### 2.6.2.1. Frequência de amostragem

De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deve maior que o dobro da máxima frequência do sinal ( $f_{máx}$ ) (expressão 15) de modo a evitar erro de *aliasing* (Baptista, 2008), que ocorre quando a frequência de amostragem apresenta uma quantidade de amostras insuficiente, como se pode verificar pela Figura 18.

$$f_s > f_{máx} \quad (15)$$

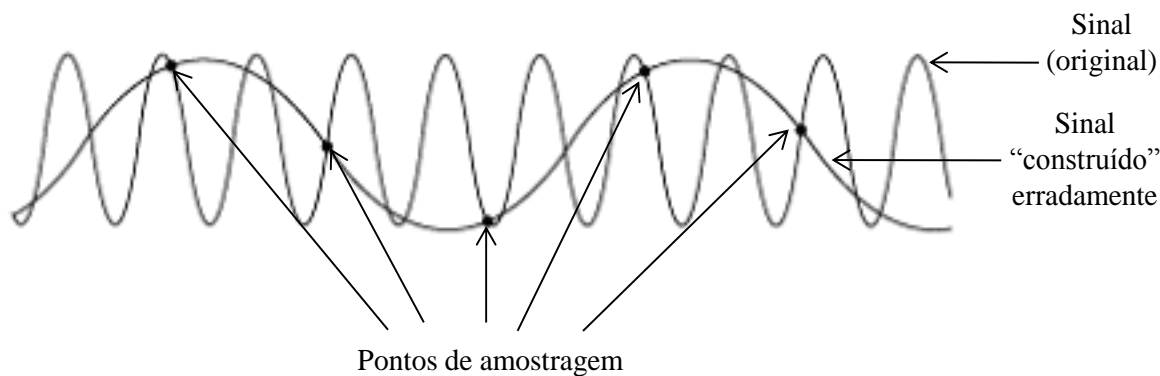


Figura 18 – Erro de *aliasing*, adaptado de (National Instruments, 2009).

Cada um dos pontos de amostragem, identificados nas Figuras 18 e 19, representam uma amostra.

Para obter um bom resultado e evitar o erro de *aliasing*, a frequência de amostragem deve ser cerca de dez vezes a frequência da antenna (Manual de Instruções, versão 1.4), de modo a assegurar um número suficiente de amostras que permitam registar adequadamente o sinal real, como ilustra a Figura 19. De facto, quanto maior for a frequência de amostragem melhor será a representação do sinal real, contudo maior será a memória necessária para o armazenamento dos dados e menor será a janela temporal (Manual de Instruções, versão 1.4).



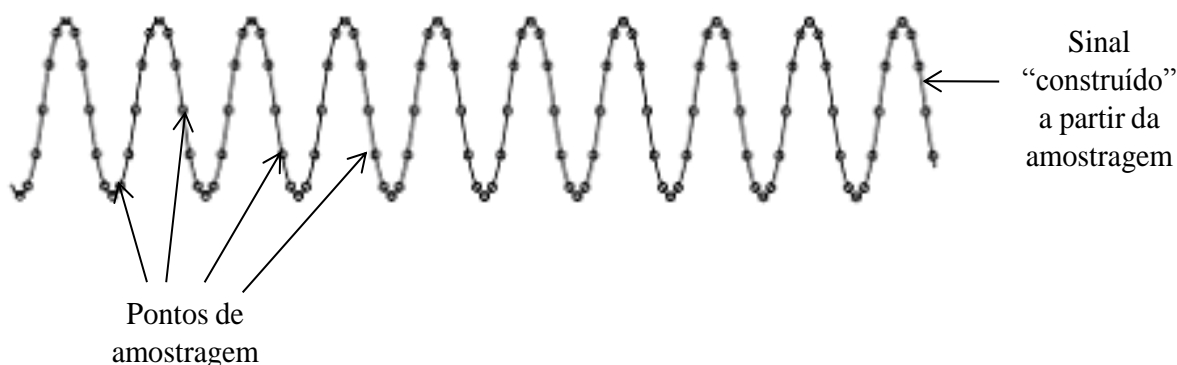


Figura 19 – Frequência de amostragem adequada, adaptado de (National Instruments, 2009).

#### 2.6.2.2. Intervalo entre traços

O intervalo entre traços é um parâmetro introduzido no software de aquisição de dados e que determina a distância (em metros) entre cada traço. Sendo que, um traço é constituído pelo conjunto das várias amostras num determinado intervalo de tempo (Manual de Instruções, versão 1.4).

Para obter uma maior resolução horizontal (ou espacial) terá que ser admitido um intervalo entre traços menor e a densidade de traços por metro será maior. Com efeito, nos estudos efectuados na parede de adobe (subcapítulo 3.4.1.) e na parede de betão (subcapítulo 3.4.2.), além da resolução vertical também se pretendia uma boa resolução horizontal e deste modo, foi utilizado um espaçamento entre traços de apenas 4 milímetros. Por outro lado, nos estudos realizados nos solos (subcapítulos 3.2.1. e 3.2.2.) para detectar os estratos do subsolo foi utilizado um espaçamento entre traços de 4 centímetros.

#### 2.6.2.3. Janela temporal

A janela temporal é definida tendo em conta o período de tempo de ida e volta (também denominado por *Two-Way Travel-Time*)  $t$  (em nanossegundos), que a onda electromagnética demora entre a antena emissora, o alvo ou interface e a antena receptora (Fernandes, 2006; Fernandes e Lourenço, 2007). O período de tempo referido pode ser determinado por meio da expressão (16), tendo em conta a profundidade ( $h$ ) prevista de um determinado alvo ou interface e a velocidade de propagação das ondas no meio ( $v$ ) onde o mesmo se insere (Fernandes, 2006).

$$t = \frac{2h}{v} \text{ (nanossegundos)} \quad (16)$$

Habitualmente, esta fórmula é utilizada para determinação da janela temporal, antes da aquisição, de modo a registar todos os sinais de interesse e evitar a obtenção de dados desnecessários, ou após a aquisição, para estimar a profundidade dos alvos detectados (Fernandes, 2006).

Assim sendo, no estudo realizado no solo de Coimbra (subcapítulo 3.2.1.) foi utilizada uma janela temporal de 265 nanossegundos, dado que os sinais relevantes deveriam estar localizados a maiores profundidades, por outro lado nas paredes de adobe (subcapítulo 3.4.1.) e de betão (subcapítulo 3.4.2.) uma vez que estas tinham apenas cerca de 30 centímetros de espessura, a janela temporal escolhida foi de 12 nanossegundos.

#### **2.6.2.4. Separação da antena**

Neste trabalho foram utilizadas antenas blindadas em modo mono-estático, as quais incluem, na mesma caixa, o transmissor e o receptor, sendo a energia apenas transmitida num único sentido (para baixo) (Manual de Instruções, versão 1.0). A distância entre estes dois elementos designa-se por separação da antena, a qual deve ser definida de acordo com a antena a utilizar (Tabela 5).

Tabela 5 – Separação da antena para cada frequência de antena da MALÅ Geoscience.

<b>Antena</b>	<b>Separação da antena (m)</b>
250 MHz	0,360
500 MHz	0,180
800 MHz	0,140
1600 MHz	0,060

A Figura 20 representa uma imagem do software utilizado neste trabalho (RAMAC GroundVision versão 1.4.5.) para processamento dos dados. Embora este software seja utilizado para aquisição, dispõe de algumas ferramentas de processamento.

## 2.7. Processamento de dados

A fase de processamento pretende melhorar a visualização dos dados de GPR e assim contribuir para a correcta interpretação dos resultados. Segue-se uma descrição resumida das ferramentas disponíveis pelo software RAMAC GroundVision versão 1.4.5. que foram utilizadas neste trabalho.

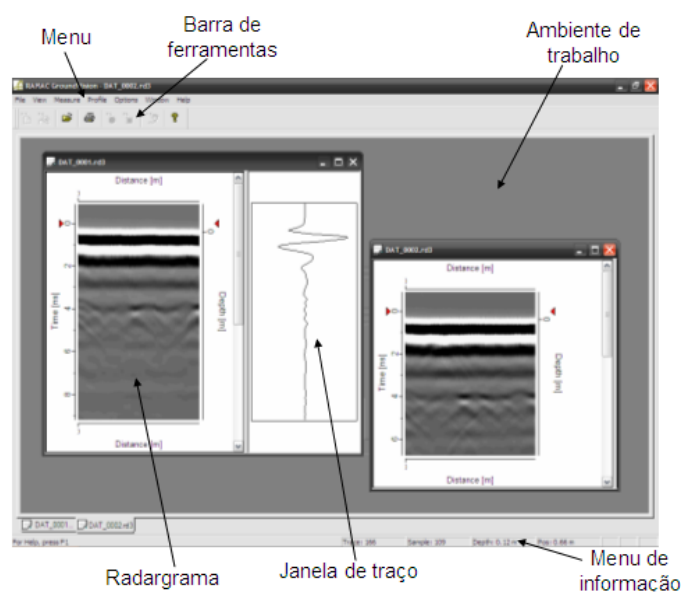


Figura 20 – Software RAMAC GroundVision versão 1.4.5.

O filtro *dewow* além de eliminar os ruídos de baixa frequência, assim como frequências indesejáveis, possibilita a remoção da componente inicial do sinal “DC” para cada traço através de um deslocamento da amplitude do sinal (Fernandes, 2006). O software referido dispõe de um filtro de remoção da componente DC de sinal, designado por *DC removal*.

O filtro *band pass* permite eliminar as altas e baixas frequências de modo a manter apenas as frequências próximas da frequência central da antena e assim remover frequências indesejáveis (Manual de Instruções, versão 1.4).

A correcção do tempo zero deve ser efectuada de modo a definir a superfície de aquisição dos dados, para que a profundidade dos alvos se aproxime o mais possível da realidade. Nesta dissertação considerou-se a superfície de aquisição correspondente ao primeiro pico positivo em termos de gráfico de amplitude, com base em Fernandes (2006).

Nos estudos efectuados nas paredes de adobe e betão, a velocidade média foi calculada e o valor obtido introduzido no software de processamento no local assinalado a cor verde na Figura 21.

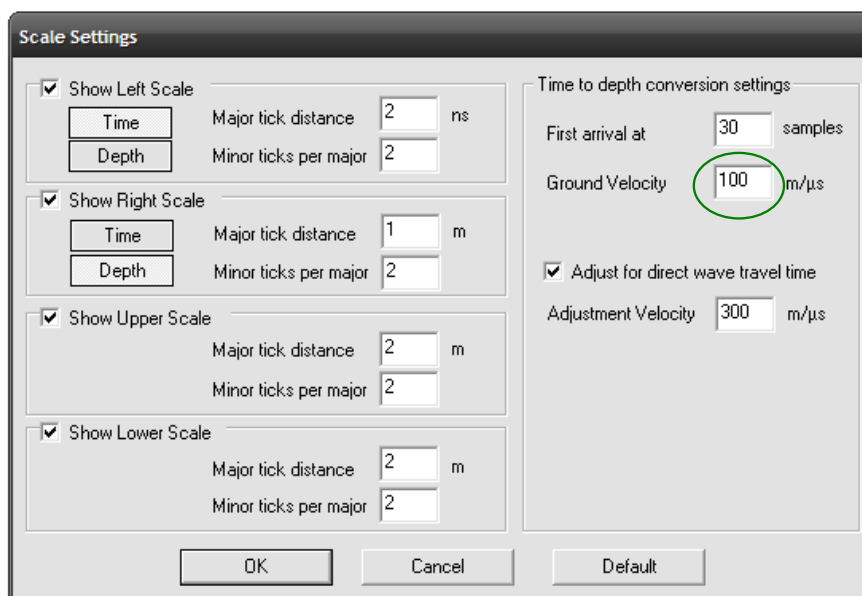


Figura 21 – Indicação do local de introdução da velocidade média no software.

Os filtros de ganho possibilitam visualizar melhor os radargramas afectados pela atenuação de sinal e/ou perdas de energia, contudo além de aumentarem a amplitude dos sinais de interesse, aumentam também a amplitude dos sinais de ruído (Cassidy 2008). O software RAMAC GroundVision versão 1.4.5. dispõe de duas funções de ganho, nomeadamente correcção de ganho automática ou *automatic gain control* (AGC) e ganho temporal variável (*time varying gain*). O AGC permite ajustar o ganho de cada traço de forma uniforme, regulariza o ganho em toda a profundidade e uniformiza as amplitudes ao longo do perfil. O filtro de ganho temporal variável permite aumentar a amplitude dos sinais a maior profundidade. A aplicação deste filtro consiste em multiplicar cada traço por uma função de ganho que resulta da combinação de duas funções, uma de ganho linear e outra de ganho exponencial (Manual de Instruções, versão 1.4).

O referido software dispõe também de dois filtros de remoção de sinal de fundo, designadamente, *background removal* e *subtract mean trace*. Estes filtros permitem remover características horizontais e aproximadamente horizontais do radargrama e foram

utilizados para evidenciar as hipérboles e acentuar as discontinuidades (Manual de Instruções, versão 1.4).

O software utilizado neste trabalho dispõe igualmente do filtro *running average filter* que permite suavizar o radargrama e tornar a imagem mais nítida (Manual de Instruções, versão 1.4).

## **2.8. Potencialidades e incertezas do método GPR**

De seguida, serão referidas algumas das principais potencialidades e incertezas do método GPR.

No que se refere às potencialidades, este equipamento utilizado em diversas áreas, é rápido na aquisição dos dados e dos resultados e permite visualizar e processar os dados em campo durante a aquisição (Cruz *et al.*, 2006). O georadar apresenta grande flexibilidade pois permite trabalhar em qualquer direcção e posição, em situações de difícil acesso, em superfícies rugosas e em vários tipos de materiais, nomeadamente, betão armado, alvenarias recente e histórica, betuminosos e madeira (Cruz *et al.*, 2006). Este método é eficiente na detecção de objectos metálicos, uma vez que estes reflectem na totalidade a ondas emitidas pelo GPR (Fernandes e Lourenço, 2007). O georadar dispõe de antenas blindadas com diferentes frequências permitindo escolher a que mais se adequa à aplicação em causa. Para uma melhor interpretação dos dados este método pode ser conjugado com outras técnicas geofísicas e completado com dados sobre o local, tais como, sondagens, relatórios, projectos, entre outros. Os resultados obtidos podem ser apresentados em 3D por meio da utilização de software apropriado.

Relativamente às incertezas do método GPR, destaca-se a influência da rugosidade da superfície exterior, da presença de vegetação e de outras obstruções que condicionam bastante os resultados adquiridos, ao influenciarem o andamento uniforme das antenas (Cruz *et al.*, 2006). Os elementos metálicos reflectem grande parte da radiação emitida pelo georadar, e como tal, não é possível detectar devidamente os elementos que se encontram por baixo destes (Fernandes e Lourenço, 2007), é o que se designa por efeito ecran eléctrico. Segundo Fernandes e Lourenço (2007), este equipamento não permite determinar o diâmetro dos varões ou de tubos encontrados. O GPR possui custos elevados no que se refere ao preço do equipamento e ao facto do processamento dos dados ter que ser efectuado por técnicos altamente qualificados (Fernandes *et al.*, 2008).

### **3. CASOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO DO GEORADAR EM ENGENHARIA CIVIL**

#### **3.1. Introdução**

Neste capítulo são apresentados diversos estudos práticos de aplicação do georadar em Engenharia Civil, de modo a avaliar as potencialidades do equipamento existente no Instituto Politécnico de Tomar em situações distintas.

O georadar foi utilizado em dois solos localizados em zonas distintas, em dois pavimentos recentes e em dois pavimentos no Instituto Politécnico de Tomar com diferentes estruturas. Este equipamento também foi utilizado numa parede de adobe e numa parede de betão, em duas lajes de betão armado e numa ponte recente de alvenaria de pedra.

Para cada caso de aplicação prática presente neste capítulo é descrito o local em estudo, a aplicação do georadar em cada situação, tal como o tratamento de dados e análise dos resultados.

#### **3.2. Aplicação em Geologia**

O georadar foi aplicado em dois locais distintos em Coimbra, num terreno próximo do Instituto Pedro Nunes e numa zona relvada no Instituto Politécnico de Tomar (IPT). Estes estudos foram motivados pela existência de sondagens que forneceram informações relevantes sobre os estratos existentes no subsolo. No IPT procedeu-se também à aplicação do método da resistividade eléctrica para validar os resultados do GPR.

##### **3.2.1. Caso de estudo prático 1**

###### **3.2.1.1. Local em estudo**

O primeiro caso de estudo foi levado a cabo num solo próximo do Instituto Pedro Nunes em Coimbra. Os registos das sondagens efectuadas neste local, com a descrição dos estratos e indicação da respectiva profundidade, podem ser observados no Anexo I.

É de realçar a dificuldade sentida em aplicar o GPR neste local, devido às irregularidades do terreno, embora a metodologia adoptada tivesse permitido sempre o contacto da antena com o solo. Na Figura 23 é apresentada uma imagem que ilustra a superfície de aquisição bastante acidentada.

### 3.2.1.2. Aplicação do georadar

O georadar foi utilizado neste local com o objectivo de identificar alguns dos estratos existentes no subsolo, e deste modo foi utilizada a antena de 250 MHz, de menor frequência disponível no IPT, para alcançar uma maior profundidade.

Para a aquisição dos dados foram efectuados 4 perfis próximos das sondagens. Os perfis realizados tal como as sondagens encontram-se assinalados no esboço que se pode observar na Figura 22.

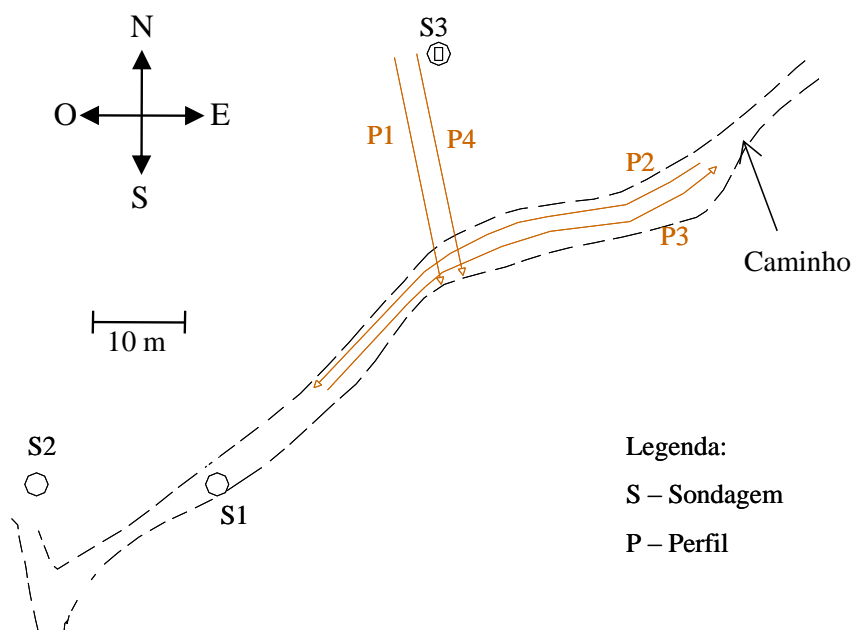


Figura 22 – Localização das sondagens (1 a 3) e dos perfis (1 a 4), adaptado de (TecBIS, IPN).

A Figura 23 ilustra a realização do perfil 1 efectuado próximo da sondagem identificada por S3 na Figura 22 e presente no Anexo I.



Figura 23 – Realização do perfil 1 com a antena de 250 MHz.

A Tabela 6 apresenta a extensão dos perfis realizados e respectivos parâmetros de aquisição.

Tabela 6 – Parâmetros dos perfis efectuados.

Perfis	Comprimento (m)	Frequência de amostragem (MHz)	Janela temporal (ns)	Intervalo entre traços (m)
1	17	3322	265	0,04
2	35	3322	265	0,04
3	39	3322	101	0,04
4	17	3322	101	0,04

### 3.2.1.3. Tratamento e análise de resultados

Após o processamento e a observação de todos os perfis obtidos, constatou-se que as irregularidades do terreno afectaram negativamente os resultados, pelo que apenas se fará alusão ao perfil 2.

O perfil 2 tem cerca de 35 metros de comprimento, porém o software RAMAC GroundVision versão 1.4.5, não permitiu apresentar todo o radargrama na mesma imagem. Esta pode ser apontada como uma das maiores limitações deste software. Sendo assim, na Figura 24, é apresentada apenas uma parte do perfil 2, até aos 34 metros de comprimento.



Segue-se uma descrição do processamento efectuado para obter o radargrama apresentado na Figura 24. Neste radargrama foram aplicados os filtros *DC removal*, *band pass* e foi ajustada a superfície de aquisição pelo primeiro pico positivo de maior amplitude. De seguida, foi aplicado o filtro *time varying gain* de modo a aumentar a amplitude e assim compensar a atenuação do sinal a maiores profundidades.

No radargrama da Figura 24 é possível distinguir alguns sinais de reflexão mais forte, entre os 10 e os 40 nanossegundos, que se destacam do restante padrão. Este sinal poderá ser devido à presença de alguns materiais grosseiros, particularmente seixos, cascalheira e calhaus sub-redondos dispersos, mencionados nas sondagens S1 a S3 do Anexo I (TecBIS, IPN). De facto, num talude muito próximo da zona em estudo pode-se verificar a presença de material grosseiro, conforme ilustra a Figura 25.

Na Figura 24 também é possível destacar um limite abaixo do qual se verifica perda de sinal, o que impossibilita a detecção dos estratos existentes no subsolo identificados nas sondagens de Anexo I. A perda de sinal poderá estar associada à presença de água no local consequência de alguma precipitação ocorrida nas semanas anteriores, embora o terreno se apresentasse seco à superfície. Por outro lado, constatou-se através das sondagens que alguns estratos do subsolo apresentam argila na sua constituição (TecBIS, IPN), o que poderá justificar a atenuação do sinal e a consequente limitação da profundidade de penetração.

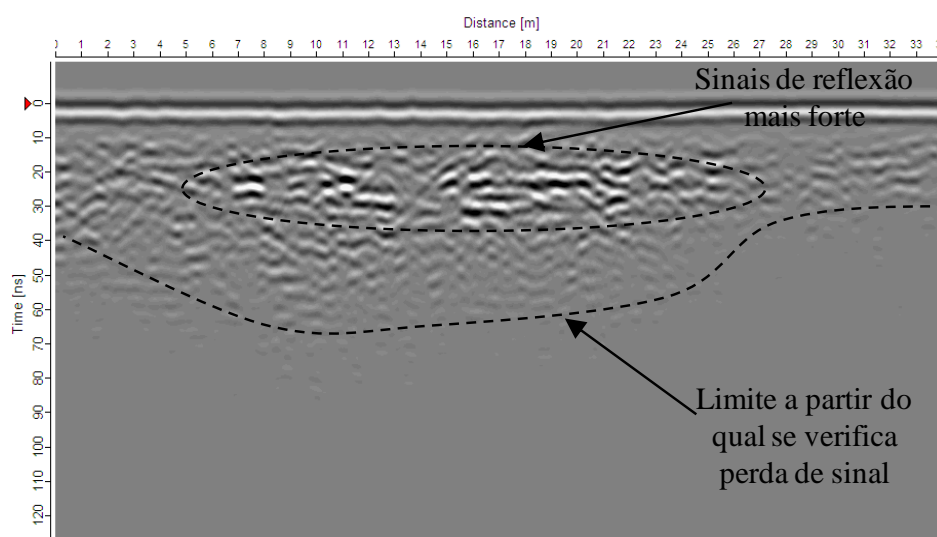


Figura 24 – Interpretação do perfil 2.

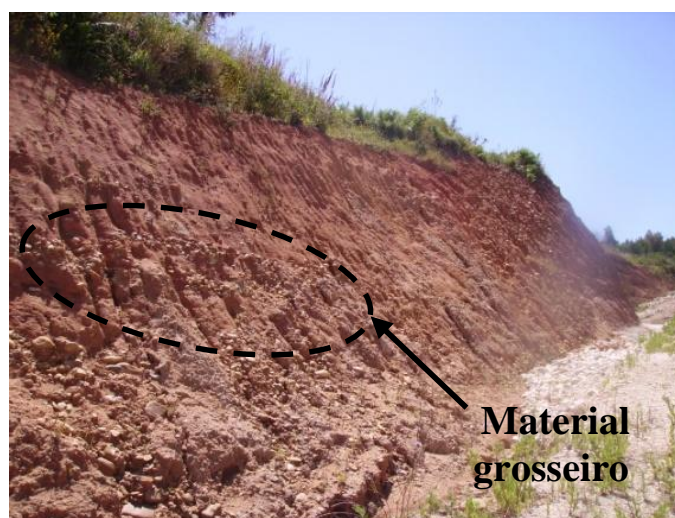


Figura 25 – Localização de seixos de maiores dimensões.

### 3.2.2. Caso de estudo prático 2

#### 3.2.2.1. Local em estudo

O segundo caso de estudo consistiu na aplicação do georadar num solo relvado no Instituto Politécnico de Tomar. Nesta situação prática recorreu-se às sondagens para obtenção de informação complementar, para uma melhor interpretação dos resultados de georadar.

Para confirmar os resultados obtidos pelo método georadar procedeu-se à aplicação no mesmo local do método da resistividade eléctrica, sobre o qual será efectuada uma breve abordagem teórica.

As Figuras 26 e 27 ilustram, respectivamente, o local em estudo e a aplicação do GPR com a antena de 250 MHz.



Figura 26 – Local em estudo.



Figura 27 – Aplicação do GPR com a antena de 250 MHz.

A Figura 28 identifica a zona em estudo (cor rosa) e as sondagens S1 e S2 realizadas nas proximidades do local. Estas sondagens, presentes no Anexo II, mostram, entre outros dados, a classificação do terreno, a espessura dos vários estratos e a respectiva profundidade.



Legenda:

S1 – Sondagem 1

S2 – Sondagem 2

Figura 28 – Localização da zona em estudo e das sondagens S1 e S2, adaptado de (Google Maps, 2010).

As sondagens identificadas na Figura 28 fazem parte do relatório de “Prospecção geotécnica para o estudo das fundações dos edifícios da Escola Superior de Tecnologia de Tomar” (Construções Técnicas, S.A., 1988). Segundo este relatório, os trabalhos de prospecção decorreram no ano de 1988 e contemplaram a execução de dezoito sondagens por furacão com sonda de percussão que alcançaram profundidades compreendidas entre 9,15 metros e 15,44 metros. Em paralelo com as sondagens foi realizado um total de cento e trinta e cinco ensaios de penetração dinâmica SPT (Construções Técnicas, S.A., 1988).

No que diz respeito à Geologia, o referido relatório (Construções Técnicas, S.A., 1988) indica que o terreno de fundação do IPT é constituído por formações miocénicas cobertas por uma camada vegetal. A camada superficial de solo vegetal, de natureza argilosa, não ultrapassa a espessura de um metro, na maioria dos locais. Relativamente à litologia das camadas atravessadas, o relatório afirma que as formações miocénicas apresentam uma sequência relativamente monótona. O mesmo relatório refere a existência, até à base das sondagens, de estratos argilosos, argiloso-siltosos e argilo-margosos, de tons amarelados, exibindo em alguns níveis congregações gresosas intercaladas. Convém destacar a existência de uma camada de argila acastanhada ou acinzentada, por vezes com restos de conchas decompostas (Complexo B), de consistência mais fraca, na grande maioria da área correspondente à parte superior do substrato miocénico. Nos gráficos das sondagens do Anexo II surge indicado o nível de água detectado (Construções Técnicas, S.A., 1988).

#### **3.2.2.2. Aplicação do georadar**

Este estudo utilizou a antena de 250 MHz de modo a alcançar uma maior profundidade com vista a detectar alguns dos estratos de solo identificados nas sondagens (Anexo II).

A Figura 29 representa um esboço do local em estudo, no qual são identificados os perfis de GPR, transversais (1 a 4) e longitudinais (5 a 8), tal como a distância entre os mesmos.

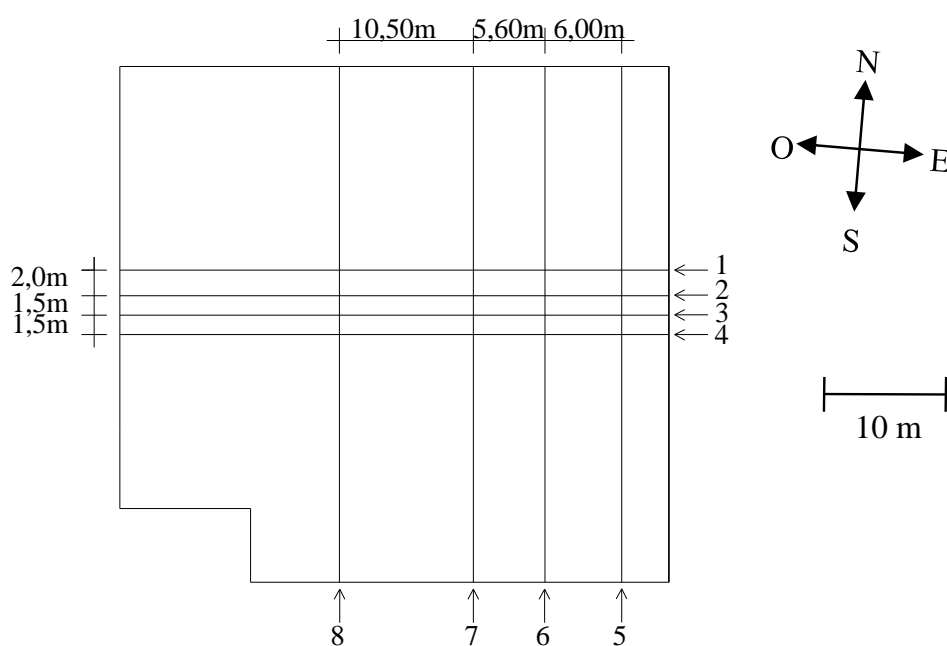


Figura 29 – Localização perfis transversais (1 a 4) e longitudinais (5 a 8).

Nas Figuras 30 a 33 são apresentados os perfis transversais (1 a 4 da Figura 29), entre os 20 metros e os 36 metros. Estes perfis foram adquiridos com uma frequência de amostragem de 5224 MHz, janela temporal de 98 nanossegundos e intervalo entre traços de 4 centímetros.

### 3.2.2.3. Tratamento e análise de resultados

Na fase de processamento dos radargramas, foram aplicados os filtros *DC removal* e *band pass* e de seguida ajustou-se a superfície de aquisição pelo primeiro pico positivo. Atendendo a que a camada superficial é de natureza argilosa (Construções Técnicas, S.A., 1988) e apresenta alguma humidade, admitiu-se para a velocidade de propagação um valor de  $1,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , de acordo com a Tabela 1. Nos perfis apresentados neste subcapítulo utilizou-se também o filtro *time varying gain* para aumentar a amplitude dos sinais a maior profundidade e o filtro *running average* que tornou a imagem mais nítida.

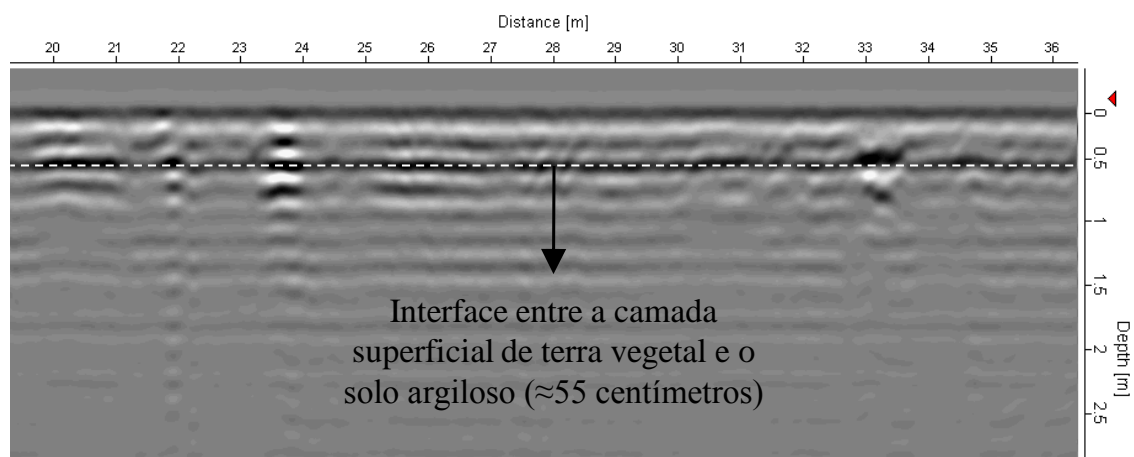


Figura 30 – Perfil 1.

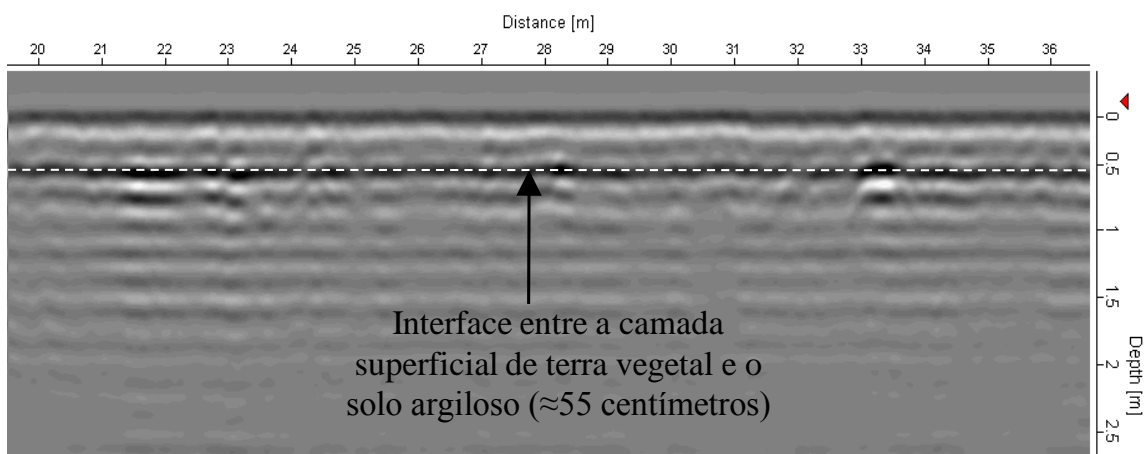


Figura 31 – Perfil 2.

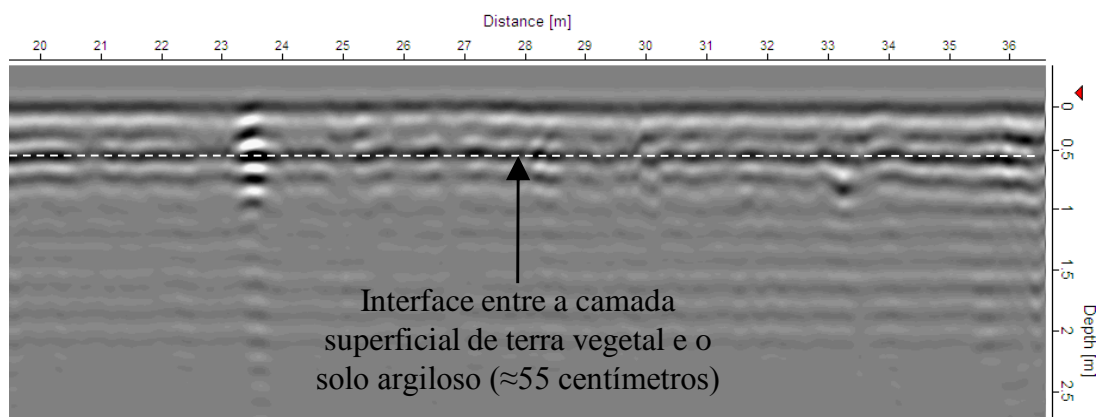


Figura 32 – Perfil 3.



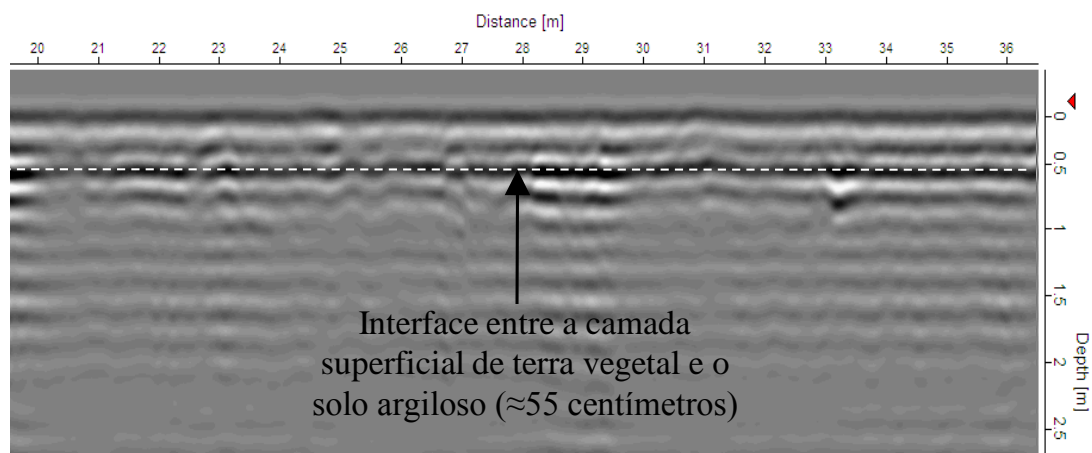


Figura 33 – Perfil 4.

Através das Figuras 30 a 33 foi possível reconhecer que todos os radargramas transversais são muito semelhantes, e ao longo de cada um destes o padrão é bastante idêntico, porém verifica-se uma camada horizontal e contínua com uma reflexão um pouco mais forte aos 55 centímetros de profundidade, a qual poderá ser apontada como a interface entre a camada superficial de terra vegetal (aterro de regularização) e o solo argiloso. De facto, segundo o relatório mencionado anteriormente (Construções Técnicas, S.A., 1988), esta camada não ultrapassa a espessura de um metro, na maioria dos locais.

A partir dos 55 centímetros de profundidade verifica-se a perda de resolução, e tudo leva a crer que esta possa estar associada à camada de argila, de acordo com as sondagens S1 e S2 e/ou à eventual presença de água resultante das regas efectuadas no espaço relvado, embora este se apresentasse seco à superfície. De facto, como já foi referido, a presença de água e argila provoca o aumento da condutividade eléctrica e consequentemente da atenuação, diminuindo assim a profundidade de penetração.

As Figuras 34 e 35 mostram dois perfis longitudinais (entre os 11 e os 27 metros) paralelos entre si, correspondentes aos perfis 5 e 7 da Figura 29. Após a análise destes perfis também se constatou a presença da referida camada a cerca de 55 centímetros de profundidade.

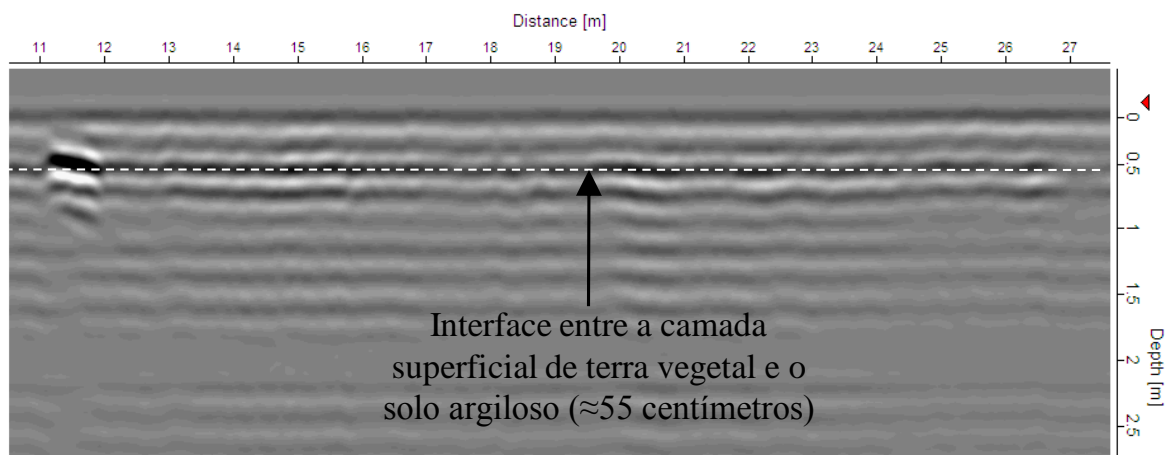


Figura 34 – Perfil 5.

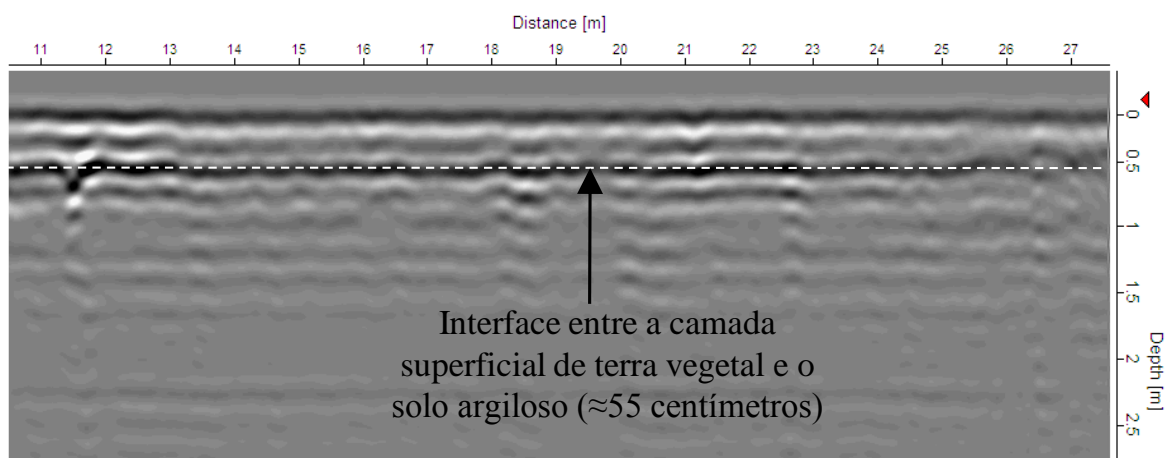


Figura 35 – Perfil 7.

#### 3.2.2.4. Método da resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica é um método não destrutivo de prospecção geofísica que consiste na injeção de corrente eléctrica no solo através de dois eléctrodos de corrente, designados por A e B e na medição da diferença de potencial eléctrico resultante, entre dois eléctrodos de potencial, denominados por M e N (Oliveira, 2009). A resistividade do terreno calcula-se considerando as “distâncias entre os eléctrodos, corrente aplicada e diferença de potencial medida, com base na Lei de Ohm” (Oliveira, 2009).

O método geoelectrico pode ser aplicado de várias formas, com distintas geometrias, conhecidas por dispositivos geoelectricos, como shlumberger (ou Sondagem Eléctrica



Vertical - SEV), wenner, dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-polo, rectângulo (ou gradiente) (Santos, 2006b). Apenas serão descritos os dispositivos de shlumberger e dipolo-dipolo, aplicados neste trabalho.

No dispositivo shlumberger (Figura 36) os eléctrodos de potencial (de leitura) (M e N) estão mais próximo do centro “o” relativamente aos eléctrodos de corrente (A e B), mas ambos são colineares e colocados simetricamente em relação ao centro (Miranda *et al.*). Para efectuar uma sondagem vertical, os eléctrodos de corrente são afastados relativamente ao centro, enquanto que os eléctrodos de potencial se mantêm fixos (Miranda *et al.*). Na figura seguinte os eléctrodos de potencial têm uma distância entre si “b” e os eléctrodos de corrente têm um afastamento de “a” em relação ao centro “o”.

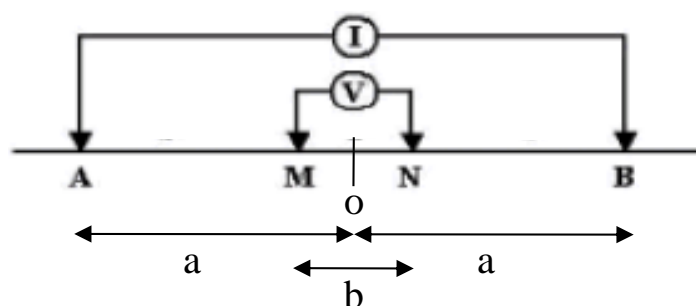


Figura 36 – Dispositivo shlumberger, adaptado de (Santos, 2006b).

No dispositivo dipolo-dipolo (Figura 37) a distância “a” entre os eléctrodos de corrente (A e B) e entre os eléctrodos de potencial (M e N) é igual (Look, 1999 in Oliveira, 2009). Para alcançar uma maior profundidade de investigação, a distância entre os eléctrodos de corrente e os eléctrodos de potencial, designada por “na”, deve ser aumentada “n” (Look, 1999 in Oliveira, 2009) (Figura 37).

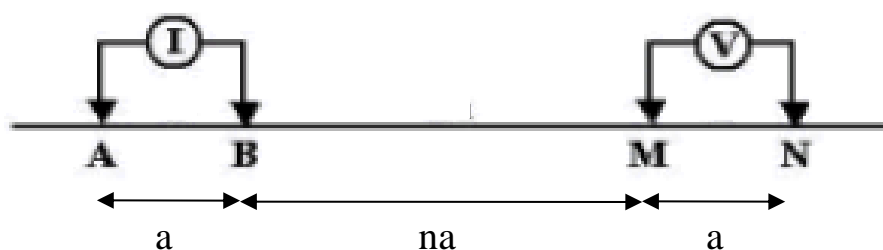


Figura 37 – Dispositivo dipolo-dipolo, adaptado de (Santos, 2006b).

Para aplicação deste método procedeu-se à execução de um perfil com dispositivo “dipolo-dipolo” e de outro perfil com dispositivo “shlumberger”, os quais foram efectuados, respectivamente, segundo o mesmo alinhamento dos perfis de georadar de 1 a 4 da Figura 29.

### 3.2.2.5. Análise de resultados

Os resultados da aplicação do método da resistividade eléctrica são apresentados sob a forma de perfis de resistividade do terreno em 2D, com diferentes cores consoante as resistividades dos materiais constituintes do subsolo (ohm.m). Segundo a escala presente nas Figuras 38 e 39, os materiais com valores de resistividade próximos de zero são bons condutores (cor azul escura), sendo que os materiais com valores de resistividade superiores (cor roxa) são maus condutores.

Após a análise dos perfis obtidos pelos dispositivos “shlumberger” (Figura 38) e “dipolo-dipolo” (Figura 39) constata-se que aproximadamente a partir de 0,65 metros de profundidade, se encontra definido um limite abaixo do qual estão presentes materiais com baixa resistividade, enquanto que nas áreas localizadas a uma profundidade inferior a resistividade é superior. A presença de materiais com menor resistividade abaixo deste limite, provocou a atenuação do sinal de GPR e diminuiu a profundidade de penetração.

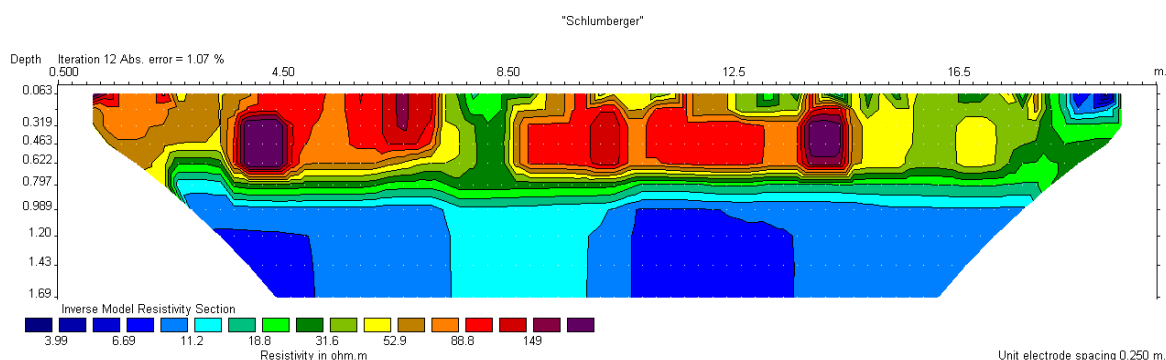


Figura 38 – Perfil com dispositivo “Schlumberger”.

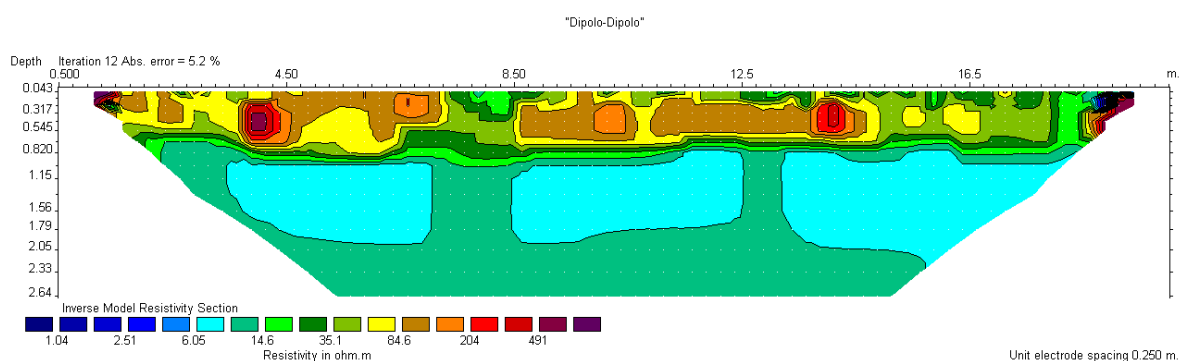


Figura 39 – Perfil com dispositivo “Dipolo-Dipolo”.

### 3.2.3. Conclusões

No primeiro caso de estudo, o GPR não permitiu identificar os estratos do subsolo a maiores profundidades, no entanto detectou a presença de alguns sinais de reflexão mais forte que poderão dever-se à existência de material mais grosseiro, particularmente seixos, cascalheira e calhaus sub-redondos dispersos. A existência de argila e eventualmente, a presença de água poderão ter limitado a profundidade de penetração do sinal. Outro factor, como a irregularidade da superfície de aquisição também influenciou negativamente os resultados, uma vez que afectou a “qualidade da resolução” e introduziu ruído nos radargramas.

No segundo caso, o georadar permitiu detectar a interface entre a camada de aterro de regularização que se encontram à mesma profundidade em todos os perfis. Neste estudo, a aplicação do método da resistividade eléctrica permitiu validar os dados obtidos pelo georadar, uma vez que os resultados entre os dois métodos são bastante consistentes entre si. O método GPR detectou uma interface aproximadamente aos 55 centímetros de profundidade e o método da resistividade eléctrica identificou um limite, aproximadamente a 65 centímetros, abaixo do qual os materiais são mais condutores. A diferença de resultados poderá dever-se ao facto dos dois métodos terem sido efectuados em meses distintos, pelo que o nível da água no solo poderá ser diferente.

Em ambas as situações práticas não foi possível detectar a interface entre estratos do solo a maiores profundidades, embora tenha sido utilizada a antena de menor frequência

existente no IPT (250 MHz), o que leva a crer que seja devido à presença de água e também de argila.

### **3.3. Aplicação em Pavimentos**

Relativamente à aplicação do GPR em Pavimentos, são apresentados três casos de estudo prático. O primeiro e o segundo casos foram realizados em dois pavimentos recentes com estruturas distintas que se encontravam interditos devido ao aparecimento de fissuras. No terceiro caso prático, efectuado no Instituto Politécnico de Tomar, foram analisadas duas zonas cujos pavimentos possuíam estruturas distintas.

Dado que o IPT não dispõe do equipamento de georadar adequado para utilizar em pavimentos rodoviários, como o que se ilustra na Figura 3, com este estudo pretendeu-se apenas distinguir a interface entre a camada granular e o solo de fundação (casos de estudo prático 1, 2 e 3), a interface entre a camada granular e a camada de betuminoso (caso de estudo 3), e eventualmente, detectar alguma camada do solo a maior profundidade.

#### **3.3.1. Caso de estudo prático 1**

##### **3.3.1.1. Local em estudo**

O primeiro caso de estudo foi efectuado num troço de um itinerário complementar bastante recente, mas que se encontrava interdito devido ao aparecimento de fissuras superficiais. Neste local quando foi efectuado o estudo com recurso ao georadar as referidas fissuras já se encontravam devidamente seladas com calda de cimento (Figura 41). As Figuras 40 e 41 ilustram o local em estudo e a aplicação do GPR com a antena de 250 MHz.



Figura 40 – Local em estudo.



Figura 41 – Realização de um perfil transversal à via com a antena de 250 MHz.

A Figura 42, obtida através do “Projecto de execução do troço do IC9 – Sublanço Alburitel / Nó de Carregueiros”, representa a estrutura do pavimento com indicação das camadas e respectivas espessuras.

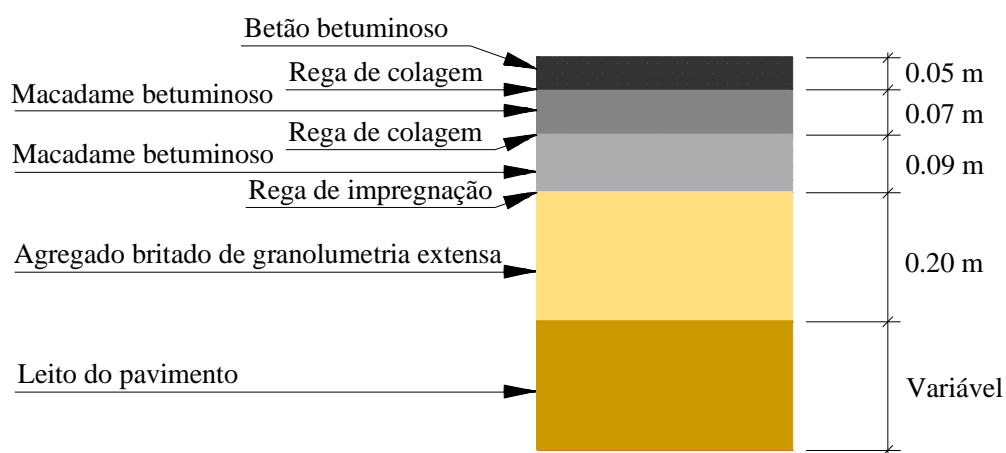


Figura 42 – Estrutura do pavimento no centro da via (Projecto de execução do troço do IC9 – Sublanço Alburitel / Nó de Carregueiros).

A estrutura do pavimento apenas difere na zona da berma, onde foram suprimidas as camadas de macadame betuminoso com 7 e 9 centímetros de espessura.

Sob a berma do pavimento, do lado da via de lentos, estão presentes alguns tubos envoltos em areia, como se pode ver na Figura 43. Esta imagem foi obtida num corte desta mesma estrada, correspondente a um troço inacabado.



Figura 43 – Tubagens sob a berma.

### 3.3.1.2. Aplicação do georadar

O objectivo deste estudo consistiu em distinguir a interface entre a camada de material granular e o leito do pavimento, detectar algum dos tubos localizados sob a berma, e eventualmente, algum estrato do subsolo localizado a maior profundidade.

Tendo em conta esta finalidade foram efectuados catorze perfis transversais paralelos, distanciados 5 metros entre si e 2 perfis longitudinais com cerca de 129 metros com a antena de 250 MHz. A frequência de amostragem escolhida foi de 5420 MHz, a janela temporal de 99 nanossegundos e o intervalo entre traços de 4 centímetros.

### 3.3.1.3. Tratamento e análise de resultados

A Figura 44 representa um perfil transversal e na Figura 45 pode ver-se um troço de um perfil longitudinal (entre 95 e 128 metros). Os radargramas apresentados nestas imagens foram sujeitos à aplicação dos filtros *DC removal* e *band pass*. De modo a evidenciar a interface entre o material granular e o leito do pavimento, e detectar eventuais sinais de interesse a profundidades superiores foi aplicado o filtro *time varying gain*. O filtro *running average* permitiu suavizar a imagem do radargrama.

O perfil transversal (Figura 44) e o perfil longitudinal (Figura 45) foram analisados em simultâneo uma vez que em ambos os radargramas se verificou um sinal horizontal,

entre os 15 e os 20 nanossegundos, com uma reflexão um pouco mais forte, que poderá corresponder à interface entre a camada de material granular e o leito do pavimento.

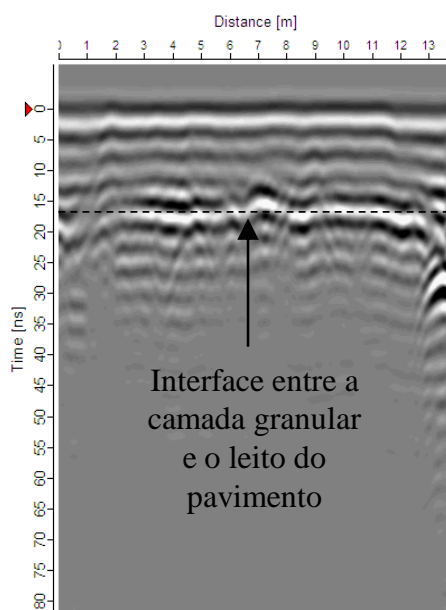


Figura 44 – Perfil transversal.

Na Figura 45 verifica-se que a interface entre a camada de material granular e o leito do pavimento não se encontra bem definida ao longo de toda a extensão longitudinal, apresentando-se incompleta e com menor resolução no final aproximadamente entre os 121 e os 128 metros. Deste modo, poderá ter ocorrido mistura entre os materiais do leito e da camada granular que passam assim a ter propriedades dieléctricas semelhantes. Outra hipótese é que poderá ter sido utilizado material inadequado para a realização de pavimentos.

Abaixo da referida interface não foi possível detectar eventuais estratos localizados a maiores profundidades, o que poderá dever-se à existência de material com propriedades dieléctricas idênticas.

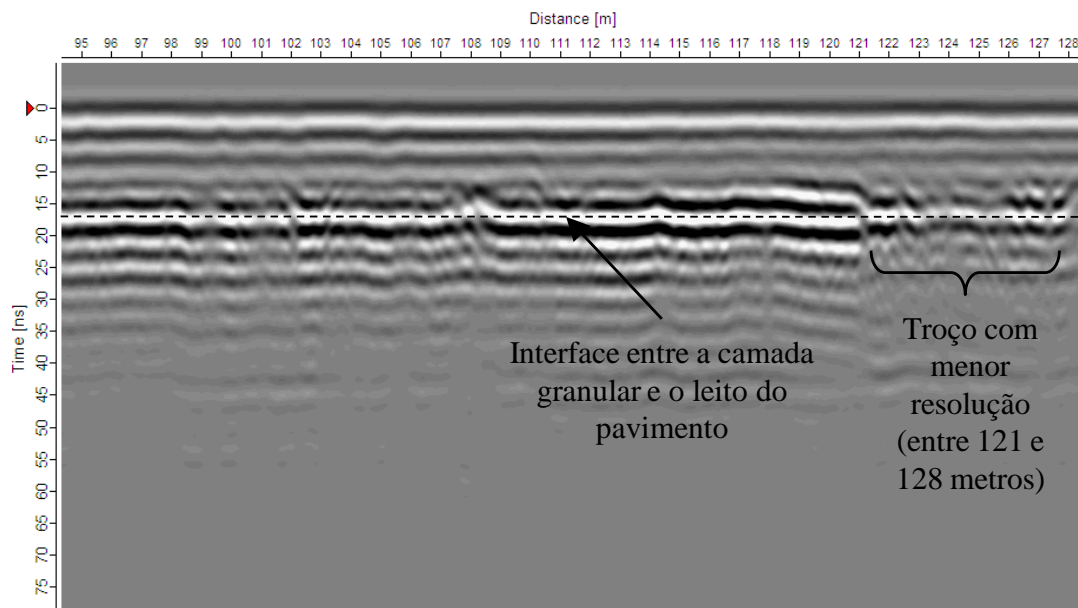


Figura 45 – Perfil longitudinal (entre 95 e 128 metros).

As Figuras 46 a 49 representam alguns perfis transversais paralelos entre si com afastamento de 5 metros. Para o processamento dos radargramas adoptou-se o procedimento utilizado nos perfis anteriores, porém, procedeu-se a um ajuste do filtro *time varying gain* de modo a destacar a hipérbole que se encontrava a uma profundidade um pouco superior relativamente à referida interface.

Como se pode verificar, os radargramas apresentados (Figuras 46 a 49) são bastante semelhantes entre si e observou-se a existência de uma hipérbole sob a berma que permite identificar apenas um dos tubos ilustrados na Figuras 43. A hipérbole é detectada no final do radargrama, a cerca de 13 metros do início do perfil e a cerca de 25 nanossegundos de profundidade. O tubo poderá apresentar-se vazio uma vez que o sinal apresenta uma reflexão forte.



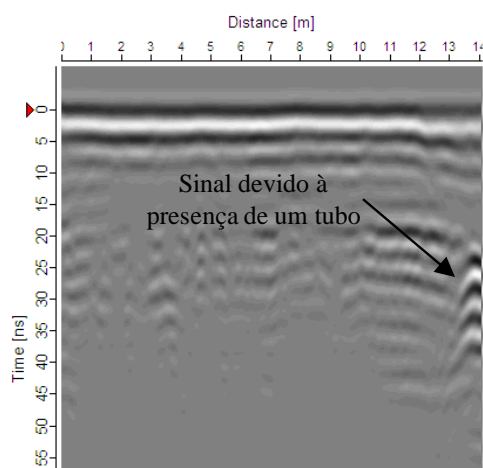


Figura 46 – Perfil transversal 1.

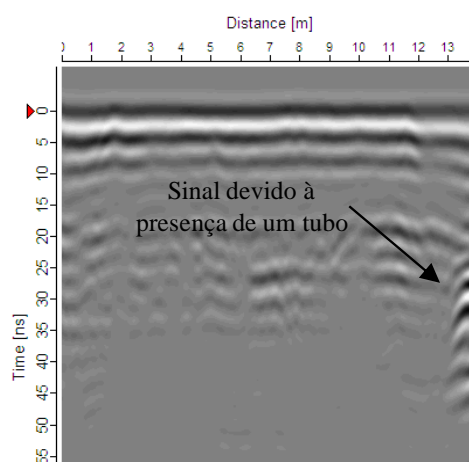


Figura 47 – Perfil transversal 2.

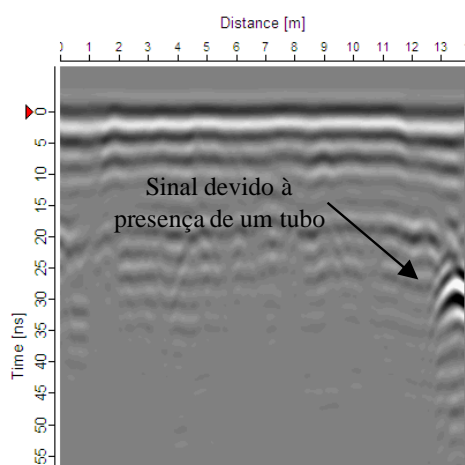


Figura 48 – Perfil transversal 3.

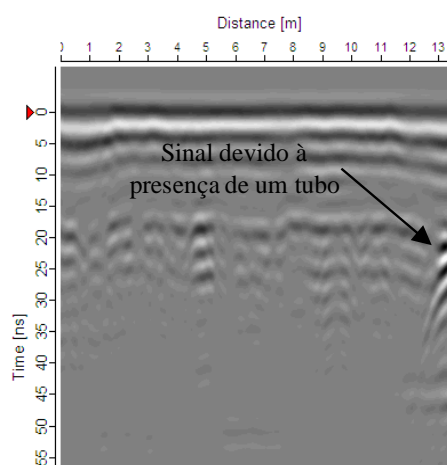


Figura 49 – Perfil transversal 4.

### 3.3.2. Caso de estudo prático 2

#### 3.3.2.1. Local em estudo

O georadar foi utilizado num troço de um itinerário complementar, que se encontra encerrado devido ao aparecimento de assentamentos e fissuração elevada que impedem a circulação automóvel.

As Figuras 50 e 51 ilustram algumas das patologias existentes e a utilização da antena de 250 MHz.



Figura 50 – Patologias existentes no local em estudo.



Figura 51 – Realização de um perfil transversal com a antena de 250 MHz.

Num local do pavimento onde existia uma fissura de grande extensão (Figura 52) efectuou-se a medição das espessuras da camada de betão betuminoso e da camada de material granular. A primeira camada apresentava 6 centímetros de espessura e a segunda camada 55 centímetros de espessura. Contudo, deve referir-se que os valores das espessuras dos pavimentos presentes na Figura 52 foram obtidos apenas num troço, e assim sendo, podem variar ou ser superiores ao longo da via.

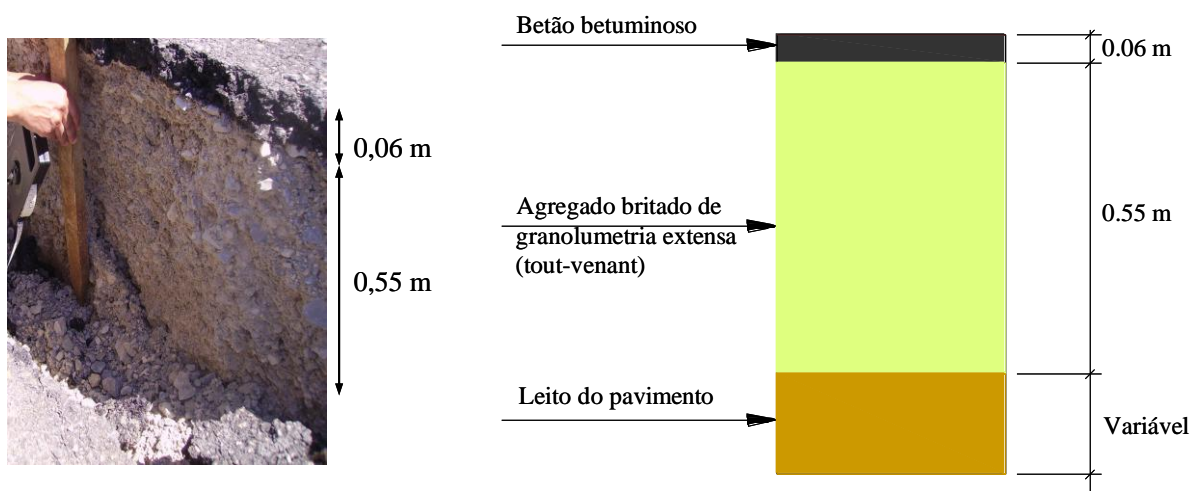


Figura 52 – Camadas do pavimento e respectivas espessuras.

### 3.3.2.2. Aplicação do georadar

Neste estudo foi aplicada a antena de 250 MHz, de modo a detectar a interface entre a camada granular e o leito do pavimento, e também numa tentativa de distinguir outros estratos existentes no subsolo localizados a maiores profundidades.

Foram efectuados três perfis longitudinais (1 a 3) de ambos os lados da fenda e três perfis transversais (4 a 6) sobre a fenda. Na Tabela 7 encontram-se alguns parâmetros relativos aos perfis efectuados.

Tabela 7 – Parâmetros dos perfis realizados.

Perfis	Comprimento (m)	Frequência de amostragem (MHz)	Janela temporal (ns)	Intervalo entre traços (m)
1	82	8673	101	0,04
2	82	8673	101	0,04
3	67	2540	211	0,04
4	6	5420	99	0,04
5	6	5420	99	0,04
6	4	5420	99	0,04

### 3.3.2.3. Tratamento e análise de resultados

Nas Figuras 53 e 54 podem ver-se dois perfis paralelos obtidos longitudinalmente à via, entre os 15 e os 48 metros. Nestes perfis foram aplicados os filtros *DC removal*, *band pass*, ajustou-se a superfície de aquisição, utilizou-se o filtro *time varying gain* para destacar a interface e eventuais estratos de solo a maior profundidade, e por fim aplicou-se o filtro *running average*.

Como se pode constatar a interface entre o material granular e o leito do pavimento encontra-se bem definida, aproximadamente entre os 15 e os 20 nanossegundos. Abaixo desta interface verifica-se perda de sinal e não é possível detectar nenhum dos estratos constituintes do subsolo. As fissuras, como as representadas nas Figuras 50 e 51, propiciam a entrada de água para o interior do pavimento, o que poderá ter levado à perda de sinal abaixo da camada granular. Outra hipótese poderá ser o facto do sinal que representa a interface ser bastante forte e por conseguinte impedir a visualização de outros estratos a maiores profundidades.

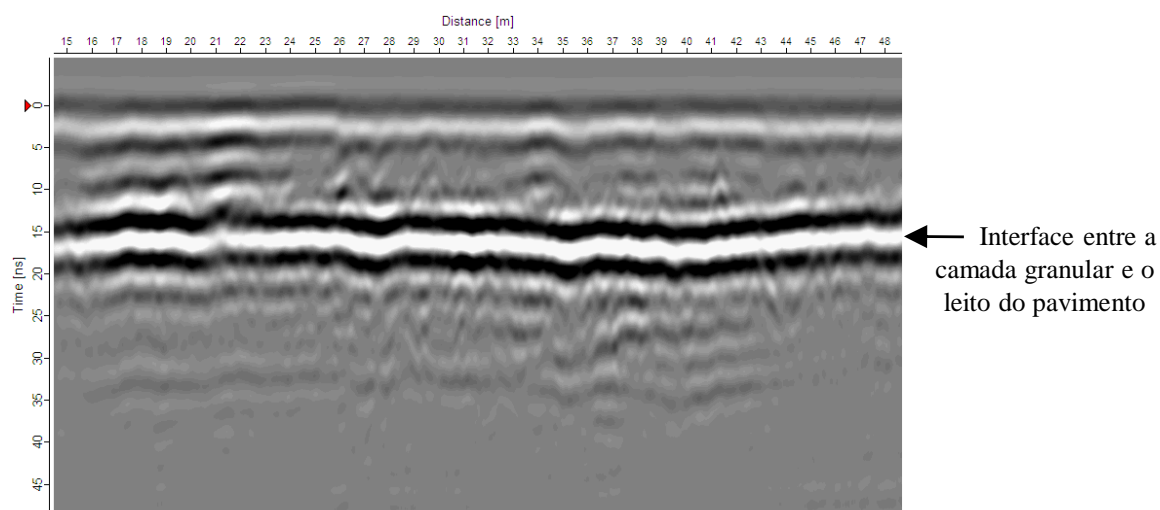


Figura 53 – Perfil 1.

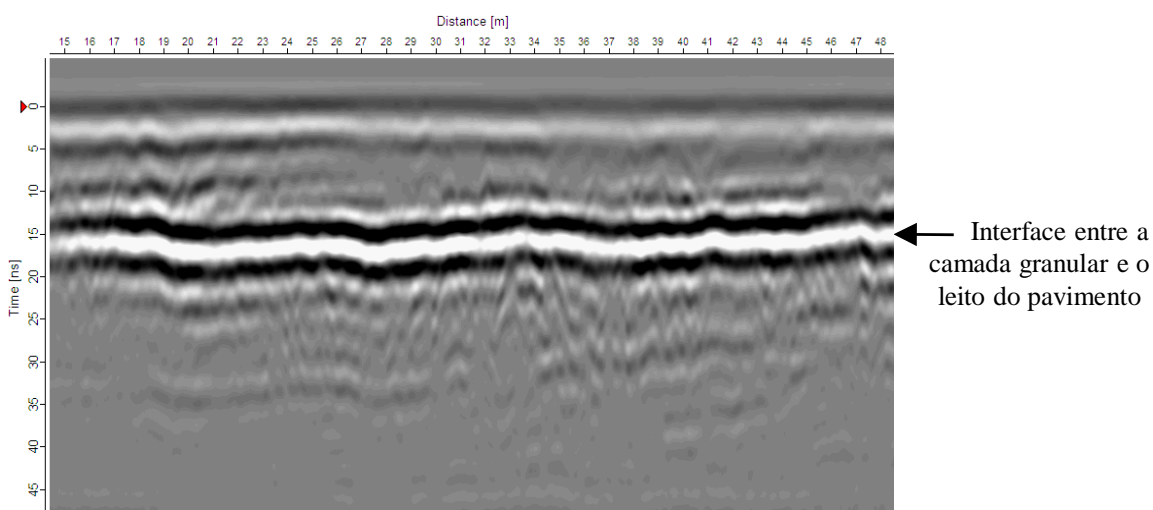


Figura 54 – Perfil 2.

As Figuras 55 a 57 representam alguns perfis transversais efectuados. A metodologia utilizada no processamento destes radargramas foi a mesma dos perfis anteriores. De facto, os radargramas apresentados nestas figuras confirmam a interface localizada entre os 15 e os 20 nanossegundos também detectada nos perfis longitudinais (Figuras 53 e 54).

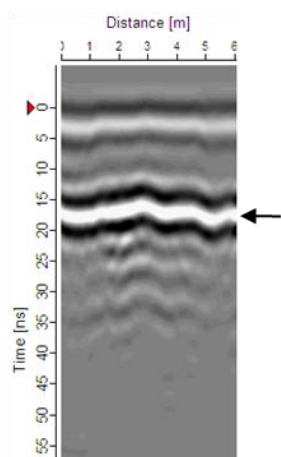


Figura 55 – Perfil 4.

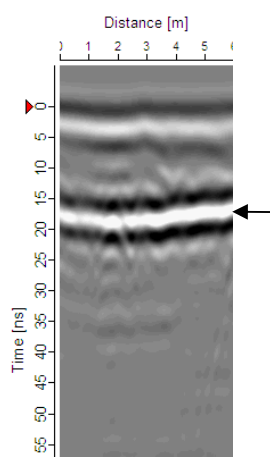


Figura 56 – Perfil 5.

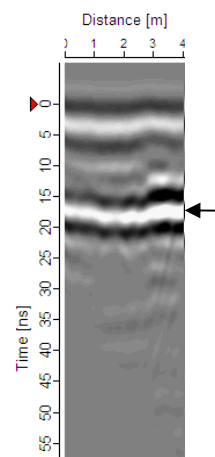


Figura 57 – Perfil 6.

### 3.3.3. Caso de estudo prático 3

#### 3.3.3.1. Local em estudo

O georadar foi aplicado em dois pavimentos distintos do IPT, identificados na Figura 60 pelas letras A e B. Nesta imagem estão localizadas as sondagens existentes nas proximidades (S2 a S7) presentes no Anexo II.

As Figuras 58 e 59 ilustram os pavimentos das zonas A e B e os perfis realizados.

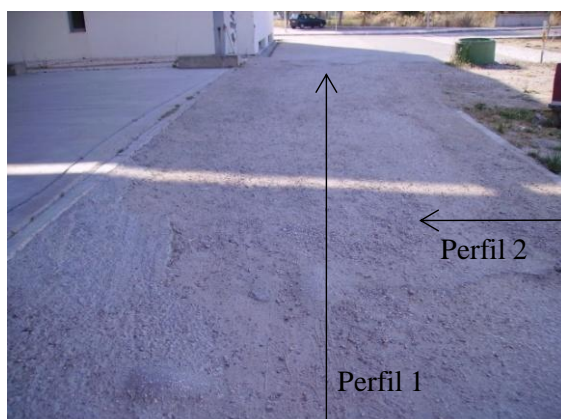


Figura 58 – Zona A.



Figura 59 – Zona B.

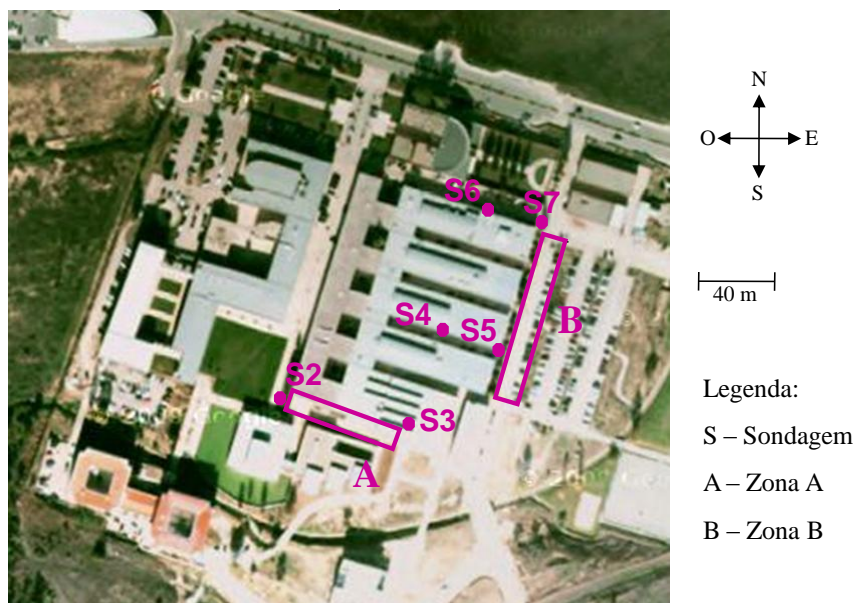


Figura 60 – Localização das zonas (A e B) e das sondagens (S2 a S7), adaptado de (Google Maps, 2010).

Com base no projecto original (Moreira, 1992), foi efectuado um esboço para cada uma das zonas (A e B) com as diferentes camadas dos pavimentos, assim como as respectivas espessuras (Figuras 61 e 62). Porém, na realidade as estruturas dos pavimentos podem variar um pouco em termos de espessura das camadas ao longo dos pavimentos.

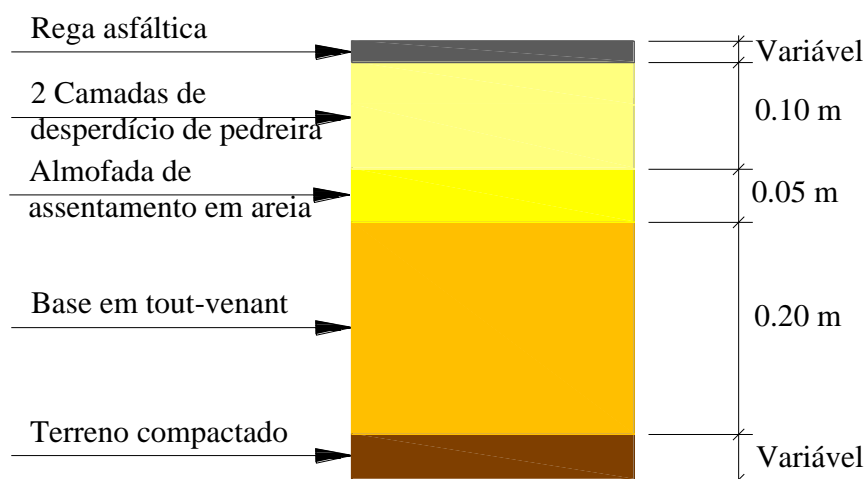


Figura 61 – Estrutura do pavimento da zona A, adaptado de (Moreira, 1992).



Através das sondagens (S2 e S7) do Anexo II verifica-se que a camada correspondente ao terreno compacto na Figura 61 é constituída por solo argiloso.

O pavimento da zona B apresenta uma estrutura diferente do anterior, como se pode observar na Figura 62. A camada de solo argiloso é confirmada pelas sondagens S2 a S7 presentes no Anexo II e localizadas na Figura 60.

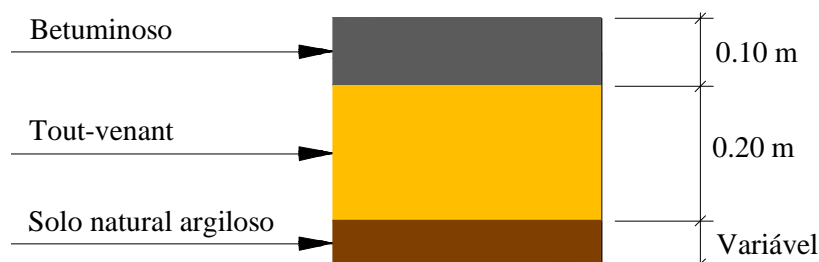


Figura 62 – Estrutura do pavimento da zona B, adaptado de (Moreira, 1992).

### 3.3.3.2. Aplicação do georadar

Neste estudo utilizou-se a antena de 800 MHz de modo a distinguir a interface entre a camada de material granular e o solo argiloso (zonas A e B) e também entre a camada granular (*tout-venant*) e o material betuminoso (zona B).

Na zona A foi efectuado o perfil longitudinal 1 (Figura 58) e o perfil transversal 2 (Figura 58), e na zona B foi efectuado o perfil longitudinal 3, identificado na Figura 59. Os perfis foram adquiridos com uma frequência de amostragem de 12045 MHz, janela temporal de 39 nanossegundos e intervalo entre traços de 8 milímetros.

### 3.3.3.3. Tratamento e análise de resultados

#### i) Zona A

Os radargramas apresentados nas Figuras 63 e 64 correspondem, respectivamente, a um trecho do perfil longitudinal 1 (entre os 61 e os 67 metros) e ao perfil transversal 2. Estes perfis foram sujeitos à aplicação dos filtros *DC removal*, *band pass* e a um ajuste da superfície de aquisição. O filtros *time varying gain* e *automatic gain control* foram utilizados com o objectivo de evidenciar a interface entre o material granular e o solo

argiloso, localizada a maior profundidade relativamente à superfície de aquisição. O filtro *running average* permitiu suavizar a imagem.

De facto, a interface entre a base em *tout-venant* e o solo argiloso foi detectada tanto no perfil longitudinal (Figura 63) como no perfil transversal (Figura 64), num intervalo entre os 5 e os 10 nanossegundos. Porém, a interface não surge toda horizontal, apresentando algumas variações ao longo do radargrama.

Apesar da antena de 800 MHz detectar o primeiro alvo a partir dos 12,50 centímetros não detectou a interface entre a almofada de assentamento em areia e a base granular com *tout-venant*, pelo que a referida camada poder-se-á encontrar a uma menor profundidade relativamente à indicada na Figura 61, ou eventualmente, poderá ter ocorrido mistura entre os dois materiais.

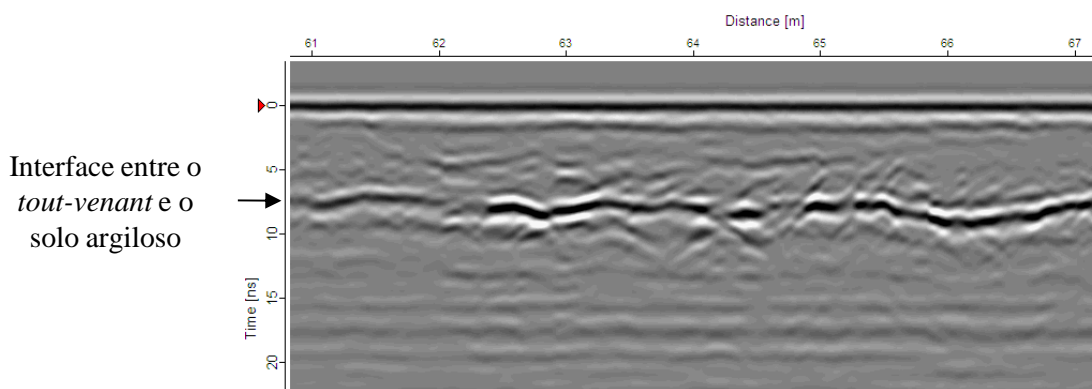


Figura 63 – Trecho do perfil 1 (entre os 61 e os 67 metros) obtido na zona A.

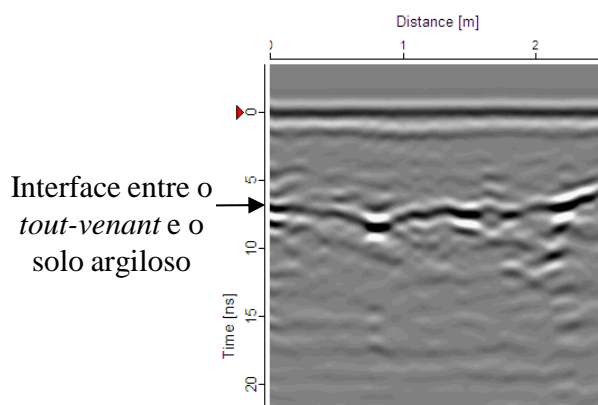


Figura 64 – Perfil 2 adquirido na zona A.



## ii) Zona B

Na Figura 65 está representada uma parte do perfil longitudinal 3 (da Figura 59), entre os 55 e os 62 metros.

O processamento efectuado neste perfil seguiu a mesma metodologia dos perfis obtidos na zona A. Como se pode constatar na Figura 65, é possível distinguir duas interfaces horizontais com uma reflexão um pouco mais forte aproximadamente aos 2 e aos 4,50 nanossegundos. O primeiro sinal horizontal ( $\approx 2$  nanossegundos) poderá ser a interface entre as camadas de betuminoso e de *tout-venant* e o segundo sinal horizontal ( $\approx 4,50$  nanossegundos) poderá corresponder à interface entre esta e a camada de solo argiloso. Tendo em conta que esta antena permite detectar o primeiro alvo a partir dos 12,50 centímetros, neste local a interface entre o material betuminoso e a camada de *tout-venant* deverá localizar-se a uma profundidade superior à indicada no projecto (Figura 62).

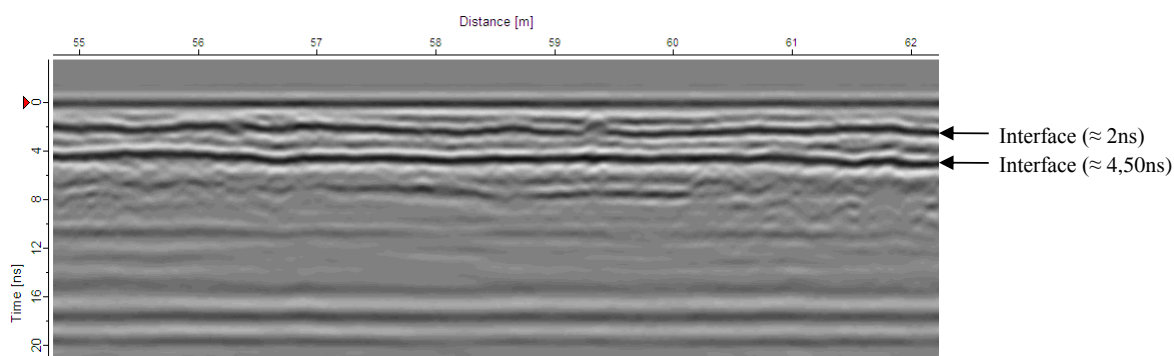


Figura 65 – Troço do perfil longitudinal 3 (entre os 55 e os 62 metros) obtido na zona B.

### 3.3.4. Conclusões

No primeiro e no segundo casos de estudo prático foi possível distinguir a interface entre o material granular e o leito do pavimento com antena de 250 MHz. Contudo, esta antena não garante uma resolução que permita detectar a interface entre o material betuminoso e a camada de material granular dado que o primeiro alvo é detectado a partir dos 40 centímetros de profundidade.

Nestas situações não se pretendia detectar as fissuras cujas espessuras eram muito reduzidas, nem a interface entre a camada de betuminoso e a camada seguinte. Se fosse

este o objectivo aconselhar-se-ia a utilização de uma antena de maior frequência como a de 1600 MHz e o intervalo entre traços deveria ser menor. No primeiro caso foi também identificada uma hipérbole que representa um dos tubos localizados sob a berma. Nestes dois casos não foi encontrada nenhuma interface entre estratos do solo, eventualmente existentes a maiores profundidades, possivelmente devido à presença de material com propriedades dieléctricas idênticas (caso de estudo prático 1), à eventual presença de água, ou ao facto do sinal que representa a interface entre o material granular e o leito do pavimento ser bastante forte e impedir a detecção de outras camadas mais profundas (caso de estudo prático 2).

No terceiro caso de estudo, com a antena de 800 MHz, foi possível detectar a interface entre o material betuminoso e a camada granular (zona B) e a interface entre esta e solo argiloso (zonas A e B).

O equipamento GPR disponível no IPT não permite investigar determinados aspectos relevantes no estudo dos pavimentos rodoviários. A título de exemplo refira-se um dos modelos de equipamento de GPR utilizado para aplicação neste tipo de pavimentos representado pela Figura 3. Este equipamento utiliza antenas tipo “horn” que podem ser utilizadas suspensas acima do solo, efectuar o ensaio com velocidades elevadas e obter uma medição da espessura do pavimento bastante precisa (GSSI, 2007 in Costa, A., 2009).

### **3.4. Aplicação em paredes**

O georadar foi aplicado em duas paredes constituídas por materiais distintos. O primeiro caso refere-se a uma parede de adobe existente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e o segundo a uma parede de betão armado do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar.

#### **3.4.1. Caso de estudo prático 1**

##### **3.4.1.1. Local em estudo**

A parede de adobe existente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro que foi utilizada para a realização da dissertação de mestrado “Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe”. Nesta dissertação surge a descrição

detalhada da construção deste modelo de parede com geometria em planta em forma de “T”, em alvenaria de adobe.

As informações obtidas por meio da referida dissertação relativamente aos vários materiais que constituem a parede, a forma como se inserem ao longo da mesma, assim como a evolução e localização dos danos existentes, apresentam uma contribuição muito significativa para a correcta interpretação dos resultados obtidos pelo GPR e para a análise das potencialidades do equipamento em paredes constituídas por este material.

De acordo com (Pereira, 2008 in Figueiredo, 2009), a parede foi construída com blocos de adobe com as dimensões de 29x45x12 cm<sup>3</sup> e argamassa à base de cal hidratada, sendo utilizada na primeira fiada de blocos uma argamassa à base de cimento. As juntas de assentamento têm uma espessura de 2,5 centímetros e o reboco apresenta uma espessura média de 2 centímetros e em algumas zonas 3 centímetros, apesar dos blocos serem muito irregulares. Seguiu-se a caiação da parede com cal hidratada (Pereira, 2008 in Figueiredo, 2009).

Como consequência do ensaio cíclico ocorreram alguns danos na parede, como sejam, a formação de uma fenda oblíqua e de duas fendas mais profundas em forma de X, as quais se prolongaram pelo interior da parede até à face oposta (Pereira, 2008 in Figueiredo, 2009).

Segundo Figueiredo (2009), procedeu-se à reabilitação da parede que englobou duas fases distintas, reparação dos danos e reforço da parede. Relativamente à reabilitação serão apenas mencionados alguns dos procedimentos efectuados que parecem pertinentes para a descrição da constituição da parede. No que se refere à reparação dos danos importa destacar a injeccção de calda constituída por água e cal hidráulica para preenchimento das fissuras presentes na parede (Figueiredo, 2009). Na fase de reforço da parede, o reboco foi removido e foi aplicada uma rede geossintética fixada por meio de cantoneiras em PVC, um fio de nylon de alta resistência e pregos com buchas plásticas (Figueiredo, 2009) com 60 milímetros de diâmetro e 95 milímetros de comprimento (Figura 66).

Com base em Figueiredo (2009), a rede ficou embebida pelo reboco, o qual foi colocado em duas fases, primeiro como camada de enchimento e depois para regularização e acabamento. A argamassa de reboco aplicada de que fazem parte a areia, o saibro e a cal aérea, apresenta um traço igual ao utilizado na construção da parede. Finalmente, efectuou-se a caiação da parede com duas camadas de cal (Figueiredo, 2009).



Figura 66 – Bucha plástica (Figueiredo, 2009).

De acordo com Figueiredo (2009), foram novamente efectuados ensaios cíclicos e dinâmicos. Da execução dos ensaios cíclicos resultaram alguns danos visíveis, designadamente, destacamento acentuado de reboco em grande parte das zonas já danificadas e fissuras ao nível das juntas de ligação da argamassa e blocos. Alguns blocos estão partidos, sendo que as roturas se verificaram principalmente nos seus cantos (Figueiredo, 2009).

Na Figura 67, que consta da dissertação referida, são identificadas de forma bastante elucidativa a localização dos danos nas faces Norte e Sul da parede de adobe.

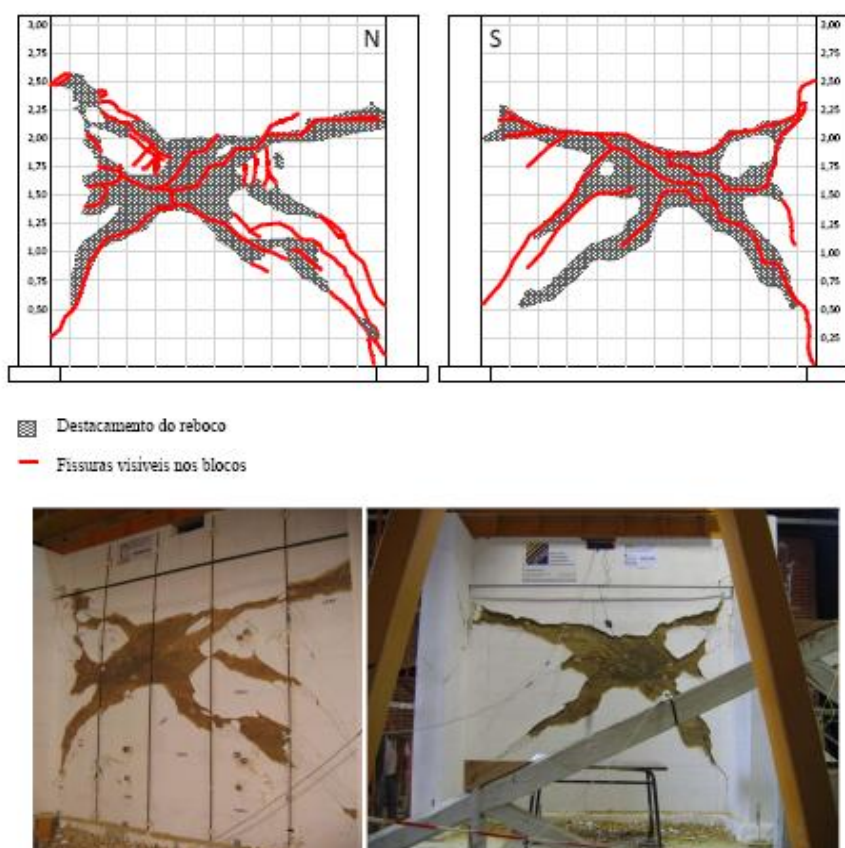


Figura 67 – Danos visíveis nas faces Norte e Sul da parede (Figueiredo, 2009).

### 3.4.1.2. Aplicação do georadar

Neste estudo foi utilizada a antena de alta frequência de 1600 MHz com o objectivo de estimar a velocidade média de propagação do sinal na parede, localizar os pregos com as buchas plásticas e detectar vazios.

O esquema de ensaio, consistiu na colocação de uma grelha sobre a parede com as dimensões de 0,80 m x 0,80 m dividida em intervalos de 0,10 metros na vertical e na horizontal. A Figura 68 ilustra a localização da grelha na face Sul da parede e a execução de um perfil horizontal sobre a malha com a antena de 1,6 GHz. Na face oposta foi repetido o mesmo procedimento.

Neste caso utilizou-se a antena de 1,6 GHz que permite obter uma resolução alta. Os perfis foram efectuados com uma frequência de amostragem de 33654 MHz, janela temporal 12 nanossegundos e intervalo entre traços de 4 milímetros.

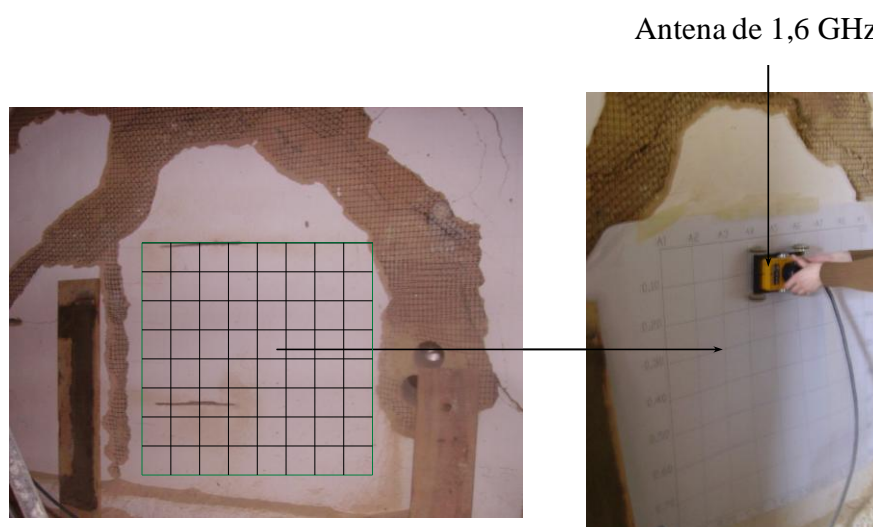


Figura 68 – Aplicação do GPR na parede e localização da malha.

O GPR foi utilizado nas faces Norte e Sul da parede, em áreas praticamente isentas de irregularidades, fissuras e destacamentos de reboco, de forma a evitar que estes danos impedissem o correcto acoplamento da antena à superfície e pudessem de alguma forma interferir nos resultados obtidos.

A Figura 69 representa a localização da malha na face Sul com os perfis verticais (de 1 a 8) e horizontais (de 9 a 17) que foram realizados.

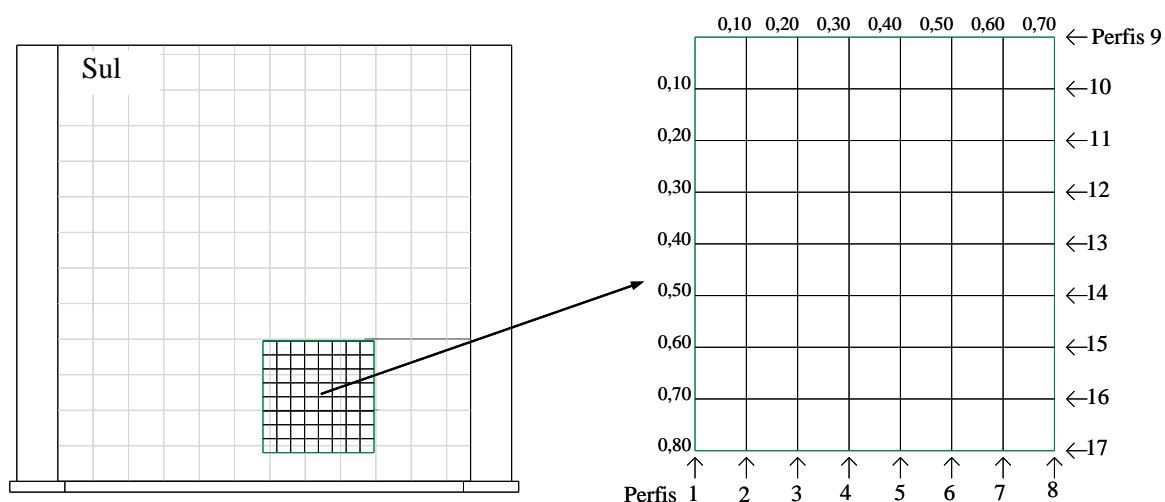


Figura 69 – Identificação e localização dos perfis realizados na face Sul da parede.

A Figura 70 ilustra a localização da grelha na face Norte da parede e os perfis efectuados, verticais (de 18 a 26) e horizontais (de 27 a 32).

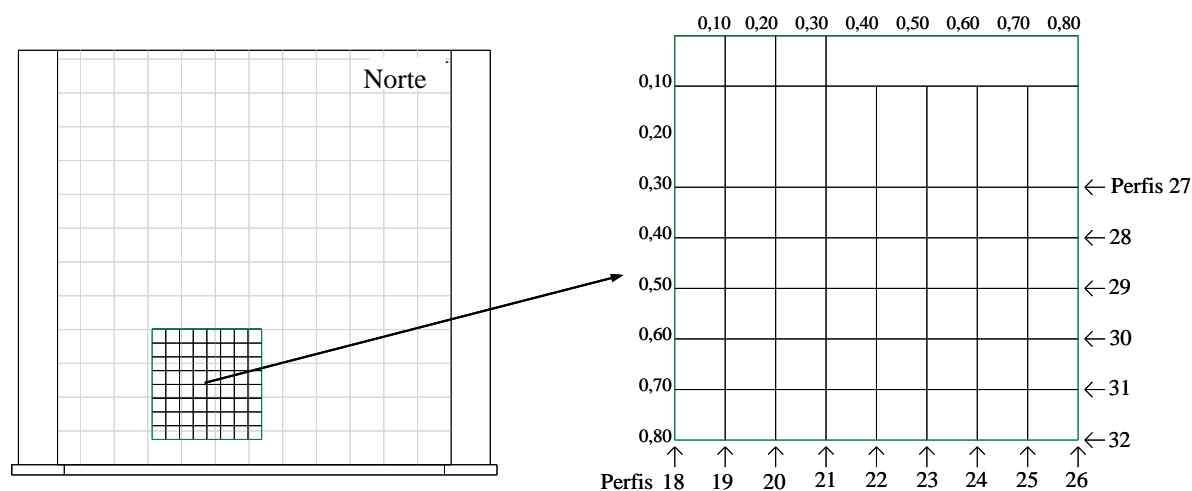


Figura 70 – Identificação e localização dos perfis realizados na face Norte da parede.

### 3.4.1.3. Tratamento e análise de resultados

O radargrama que se pode ver na Figura 71 foi sujeito à aplicação dos filtros *DC removal*, *band pass* e *running average*. A superfície de aquisição foi determinada pelo primeiro pico de amplitude positiva, como se pode verificar nesta figura. O radargrama

apresentado na Figura 71 foi obtido na horizontal da Face Sul e mostra a superfície oposta bem definida através de um sinal de reflexão mais forte, sendo esta a razão porque foi escolhido para a determinação da velocidade. De salientar que além deste perfil, também os perfis 12 (da Figura 85) e 13 (da Figura 80) adquiridos também na horizontal apresentam a superfície oposta bem definida através de um sinal horizontal.

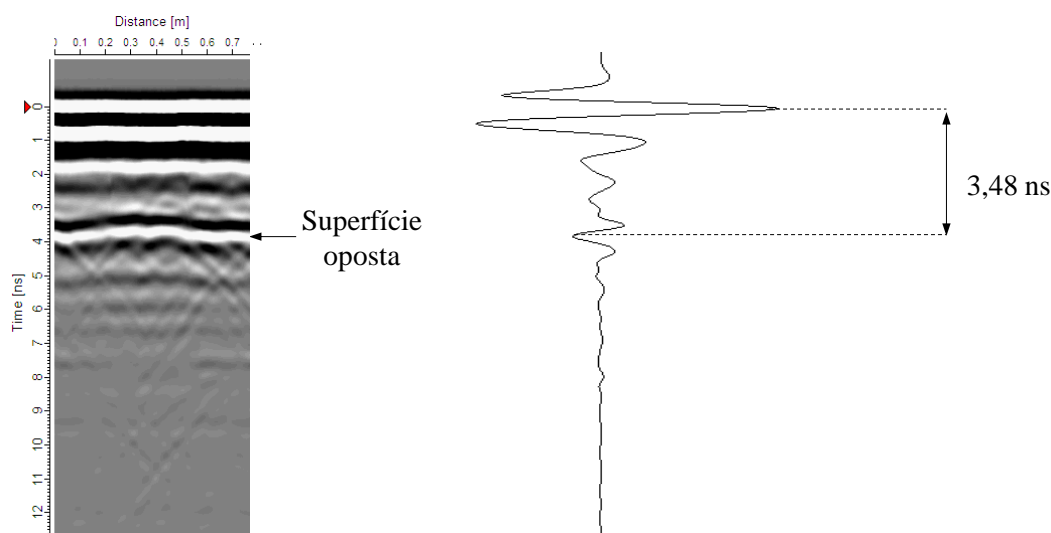


Figura 71 – Determinação do intervalo de tempo entre a superfície de aquisição e a superfície oposta (Perfil 11).

Como se pode constatar, o sinal demora em média 3,48 nanossegundos a atravessar a parede com 0,295 metros de espessura. Aplicando a expressão  $v = \frac{2h}{t}$ , a velocidade média de propagação do sinal de GPR nesta parede é de  $169,88 \pm 4,11 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ . O valor obtido está de acordo com os valores de velocidade tabelados para os materiais que constituem os blocos de adobe, designadamente, areia e argila secas (Tabela 1). O facto de a velocidade ser elevada poderá dever-se também à porosidade da parede, tendo em conta que o aumento do número de vazios provoca o aumento da velocidade de propagação. Na Figura 71, a interface que representa a superfície oposta não se encontra completamente horizontal o que justifica que em alguns locais da parede a velocidade de propagação seja superior.

Porém, verificou-se que nos perfis adquiridos na vertical das faces Norte e Sul a superfície oposta é definida por algumas hipérboles. Os radargramas das Figuras 72 a 77 foram sujeitos a uma sequência de processamento idêntica. Com efeito, foram aplicados os

filtros *DC removal*, *band pass*, introduziu-se a velocidade obtida anteriormente de modo a localizar correctamente os alvos em profundidade e ajustou-se a superfície de aquisição. Aplicou-se um filtro de ganho (*time varying gain*) para evidenciar a superfície oposta, e por fim utilizou-se o filtro *running average*.

Na face Sul da parede os perfis verticais são bastante semelhantes entre si, como se pode ver nas Figuras 72 a 74, tal como os perfis verticais representados nas Figuras 75 a 77 que se referem à face Norte da parede. As hipérboles que se verificam na superfície oposta dos radargramas das Figuras 72 a 77 poderão dever-se ao cruzamento do GPR com as juntas horizontais entre os blocos, visto que a argamassa de ligação e os blocos deverão ter propriedades dieléctricas distintas entre si.

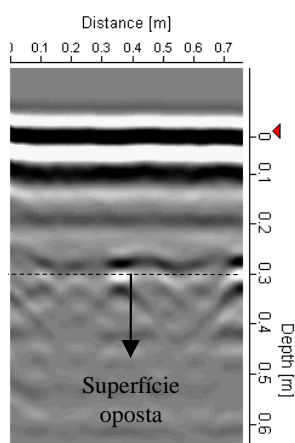


Figura 72 – Perfil 1.

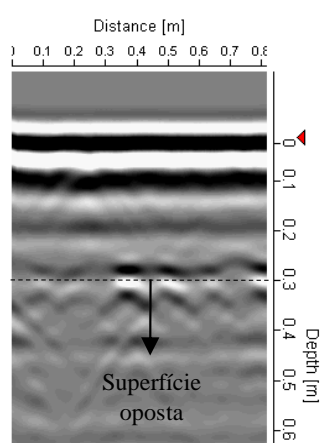


Figura 73 – Perfil 2.

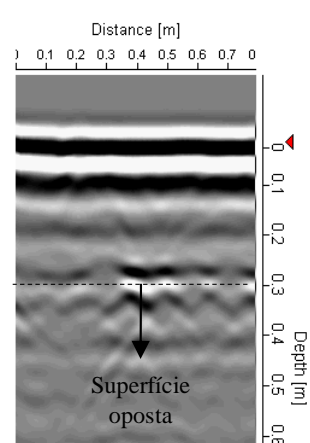


Figura 74 – Perfil 3.

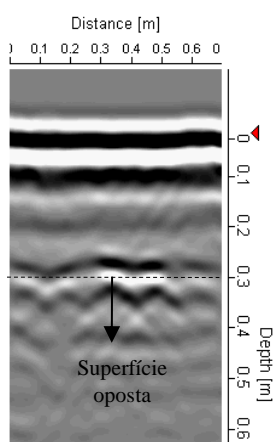


Figura 75 – Perfil 22.

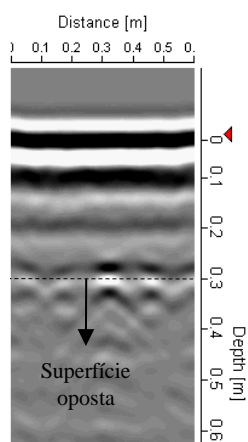


Figura 76 – Perfil 25.

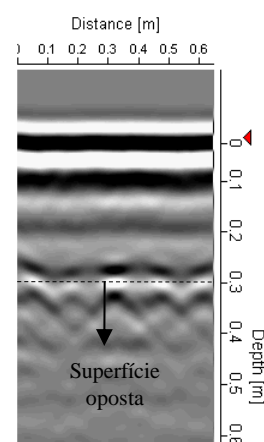


Figura 77 – Perfil 26.



Para os perfis das Figuras 78 a 88 foi utilizado um processamento idêntico ao aplicado nos radargramas anteriores, assim foram aplicados os filtros *DC removal*, *band pass*, *time varying gain* para destacar eventuais sinais de interesse no interior da parede e o filtro *running average*. Porém, também foi utilizado o filtro de remoção de fundo, *background removal* de modo a eliminar os sinais horizontais e melhorar a visibilidade de alguns sinais relevantes.

No perfil 5 da Figura 78, observou-se a presença de um sinal com reflexão um pouco mais forte ao centro. Após a aplicação do filtro *background removal* o sinal ficou bem evidenciado e começa a ser notado antes dos 10 centímetros de profundidade (Figura 79).

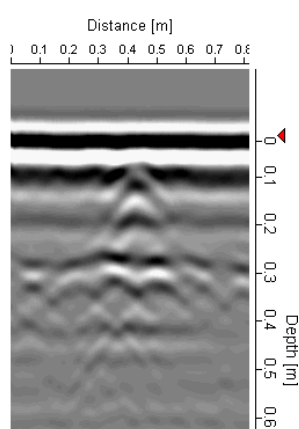


Figura 78 – Perfil 5.

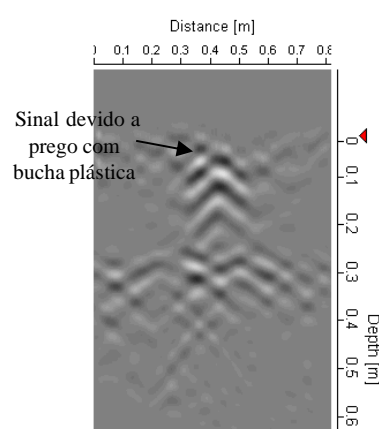


Figura 79 – Perfil 5 após aplicação do filtro *background removal*.

No perfil 13 que se pode ver nas Figuras 80 e 81 o mesmo sinal foi detectado a cerca de 30 centímetros do início do perfil.

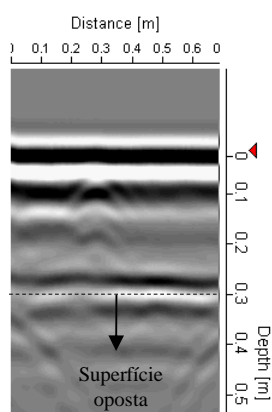


Figura 80 – Perfil 13.

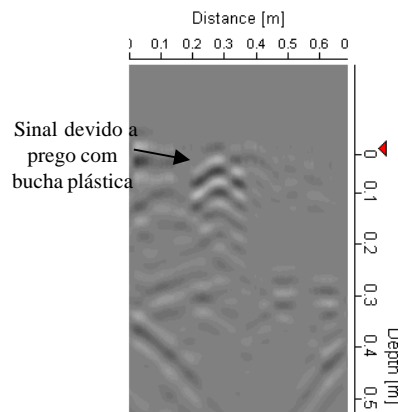


Figura 81 – Perfil 13 com aplicação do filtro *background removal*.

A localização deste sinal é bastante precisa e surge no radargrama muito próximo da superfície, pelo que poderá ser apontado como a presença de um prego com bucha plástica. Com base na posição deste elemento no perfil 5 (Figuras 78 e 79) e 13 (Figuras 80 e 81), procedeu-se à sua localização na grelha e na parede, por um ponto a cor laranja, como se pode verificar na Figura 82, correspondente à face Sul da parede.

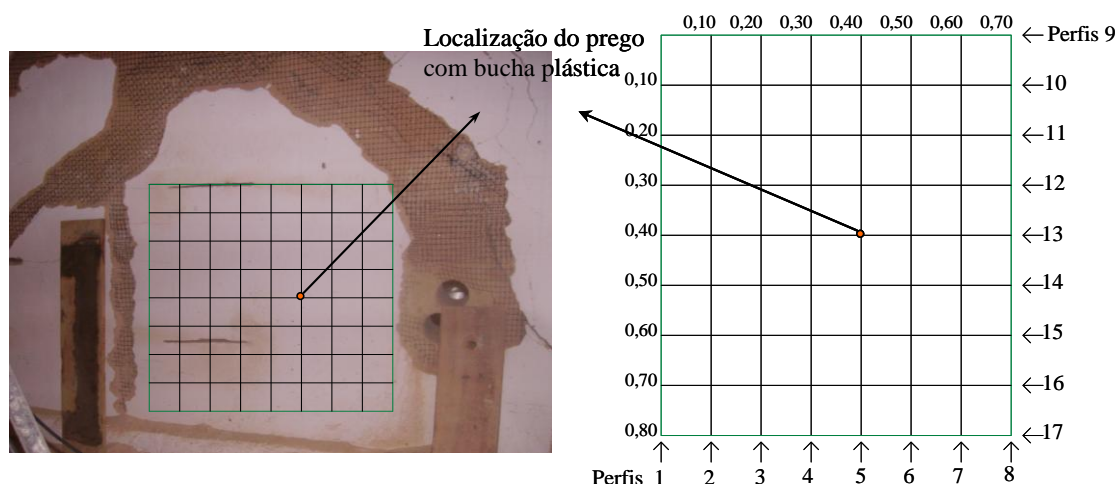


Figura 82 – Localização do prego com bucha plástica na parede e na grelha (face Sul).

No perfil 7 representado pelas Figuras 83 e 84 verificou-se ao centro a presença de um sinal de reflexão mais forte. Porém este sinal localiza-se a uma maior profundidade aproximadamente entre os 10 e os 20 centímetros, pelo que poderá significar a existência de um vazio existente no interior da parede.

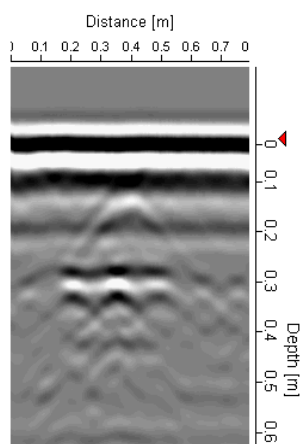


Figura 83 – Perfil 7.

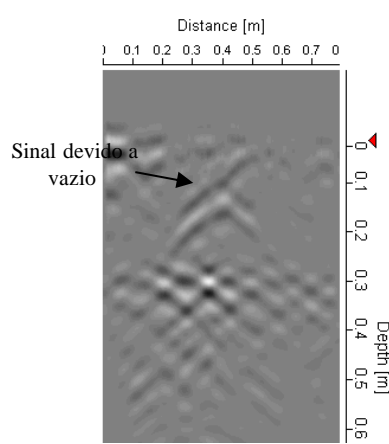


Figura 84 – Perfil 7 após aplicação do filtro *background removal*.

No perfil 12 apresentado nas Figuras 85 e 86, verificou-se também a existência de um sinal de reflexão mais forte entre os 10 e os 20 centímetros de profundidade que poderá corresponder a um vazio existente no interior da parede.

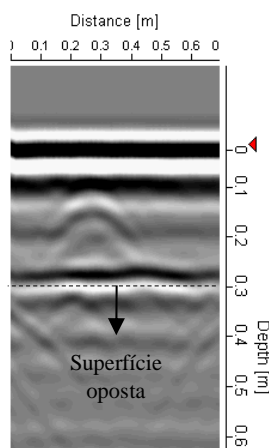


Figura 85 – Perfil 12.

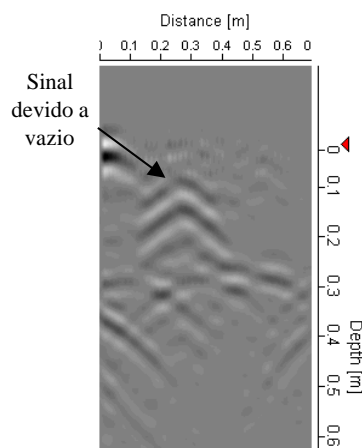


Figura 86 – Perfil 12 com o filtro *background removal*.

O perfil 18, representado nas Figuras 87 e 88, foi obtido na face Norte da parede. Neste perfil foi encontrado um sinal de fraca reflexão, evidenciado através de um ajuste do filtro *time varying gain* e por meio da aplicação do filtro *background removal* (Figura 88). Este sinal encontra-se aproximadamente a 20 centímetros de profundidade e poderá indicar a existência de um vazio no interior da parede.

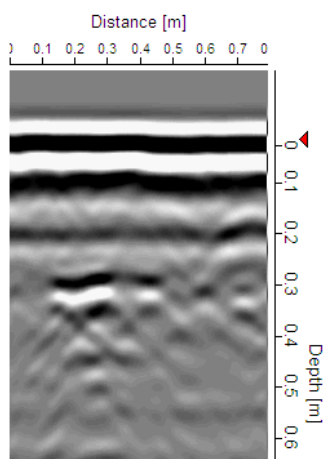


Figura 87 – Perfil 18.

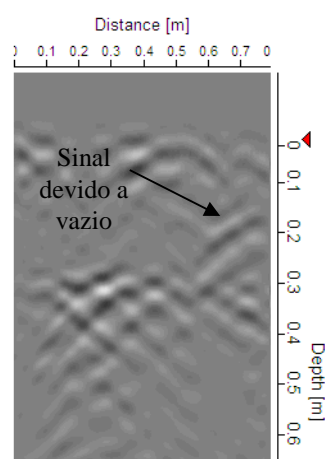


Figura 88 – Perfil 18 com ajuste do filtro *time varying gain* e filtro *background removal*.

### 3.4.2. Caso de estudo prático 2

#### 3.4.2.1. Local em estudo

A parede de betão armado encontra-se no Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar e é utilizada como uma parede de reacção para realização de diversos ensaios. As Figuras 89 e 90 ilustram respectivamente as faces A e B da parede. A parede tem uma espessura de 0,30 metros e a face A onde foi aplicado o GPR tem um comprimento de 4,00 metros e uma altura de 2,50 metros (Figura 89). Os cilindros de metal embutidos na parede têm entre si um afastamento de 0,33 metros (Figura 92).

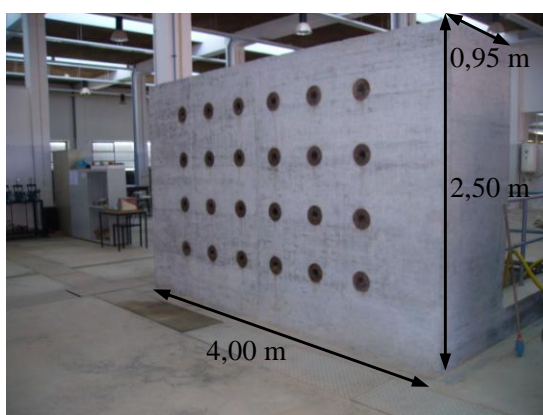


Figura 89 – Face A.



Figura 90 – Face B.

#### 3.4.2.2. Aplicação do georadar

O ensaio efectuado na parede de betão armado teve como objectivos estimar a velocidade média de propagação do sinal na parede, verificar a eficácia do GPR na localização de varões de aço, na determinação do seu afastamento e na verificação do seu alinhamento.

O equipamento utilizado foi o georadar RAMAC/GPR da MALÅ Geoscience com a antena de 1,6 GHz. A escolha da antena de alta frequência deveu-se à necessidade de obter resultados com alta resolução.

Neste estudo utilizou-se uma malha de forma quadrada com 80 centímetros de lado aplicada sobre a parede de reacção, de modo a garantir o paralelismo entre os perfis e um espaçamento constante de 10 centímetros entre os mesmos. A Figura 91 ilustra a grelha fixa à parede e a aquisição de um perfil vertical de GPR com a antena de 1,6 GHz.

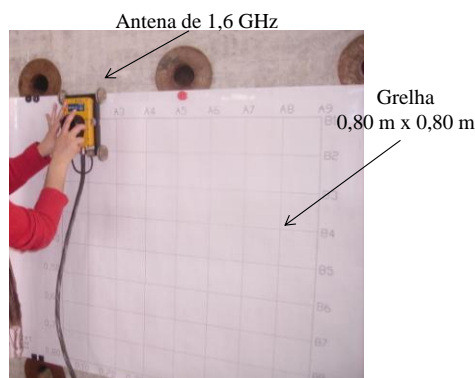


Figura 91 – Aplicação do GPR na parede com a antena de 1,6 GHz.

Foram efectuados 9 perfis verticais e 9 perfis horizontais com 0,80 metros de comprimento. A Figura 92 ilustra a posição da grelha auxiliar na parede para execução dos perfis, tal como as respectivas dimensões. Nesta figura foram devidamente identificados e localizados os perfis efectuados na vertical (1 a 9) e na horizontal (10 a 18). Os perfis foram adquiridos com uma janela temporal de 12 nanossegundos, frequência de amostragem de 33654 MHz e intervalo entre traços de 4 milímetros.

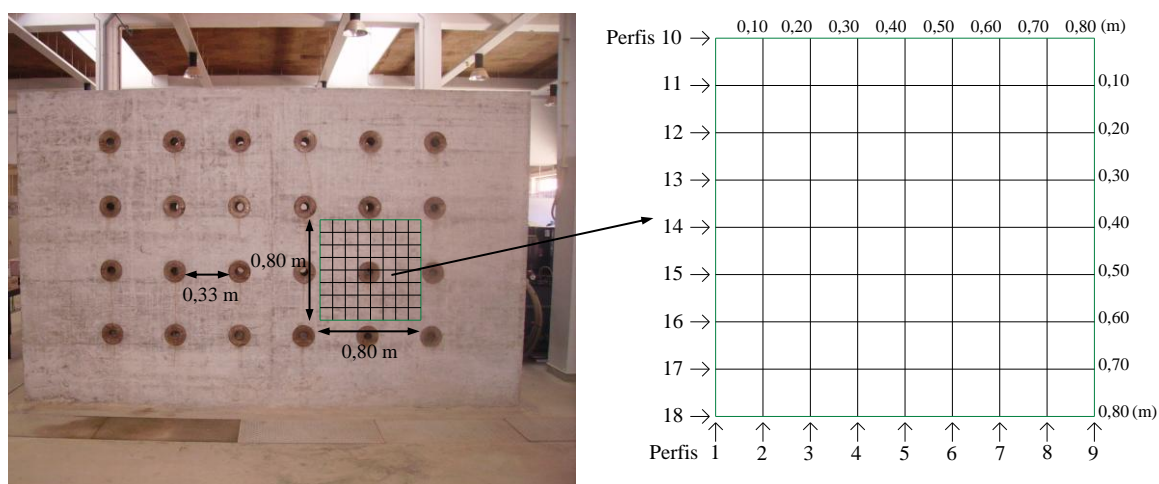


Figura 92 – Localização da grelha na Face A e identificação dos perfis verticais (1 a 9) e horizontais (10 a 18).

Para determinar a velocidade média de propagação das ondas foi colocada na face oposta da parede uma chapa de aço apoiada através de alguns objectos, como se pode observar na Figura 93. Este procedimento permitiu evidenciar no radargrama, a superfície oposta da parede.



Figura 93 – Chapa de metal colocada na face B da parede.

### 3.4.2.3. Tratamento e análise de resultados

Na presença da chapa de aço apoiada na superfície oposta foi efectuado um perfil no alinhamento do perfil 2 da Figura 92 com 1,20 metros de comprimento. O radargrama da Figura 94 foi sujeito à aplicação dos filtros *DC removal*, *band pass*, *running average* e aos filtros de ganho *time varying gain* e *automatic gain control* que permitiram evidenciar a superfície oposta.

Na Figura 94, a superfície de aquisição foi ajustada pelo primeiro pico positivo e a superfície oposta foi obtida pelo pico que apresentava maior amplitude. Constatou-se que o sinal demorou em média 5,93 nanossegundos a atravessar a parede com 0,30 metros de espessura. Pela aplicação da fórmula  $v = \frac{2h}{t}$ , verificou-se que a velocidade média do sinal de GPR na parede em estudo é de  $101,13 \pm 0,82 \text{ m.}\mu\text{s}^{-1}$ .

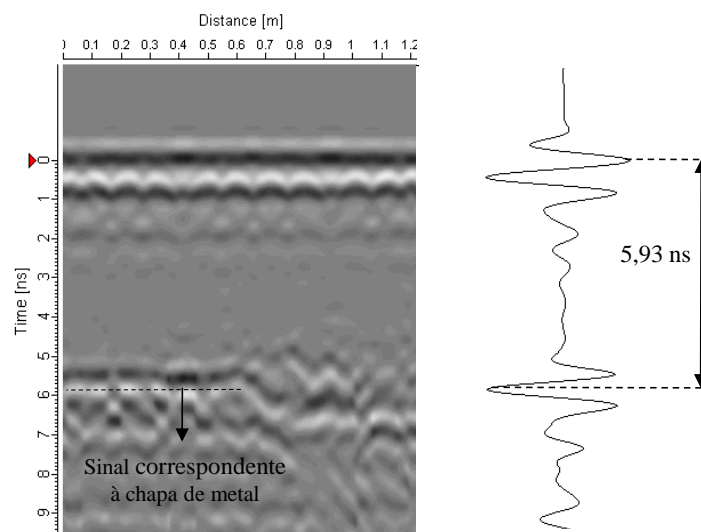


Figura 94 – Determinação do tempo necessário para o sinal atravessar a parede.

Com a finalidade de estudar a posição das armaduras horizontais, foram analisados todos os perfis verticais (1 a 9 da Figura 92). Para o processamento dos perfis aplicaram-se os filtros *DC removal* e *band pass*. Introduziu-se a velocidade obtida no software e ajustou-se a superfície de aquisição. Aplicou-se também o filtro *running average* que possibilitou suavizar a imagem do radargrama e ajustou-se o contraste de modo a evidenciar as armaduras.

Após a análise dos perfis verificou-se que estes são bastante semelhantes entre si.

O afastamento entre as armaduras foi determinado pela distância entre os centros das hipérboles. A Figura 95 mostra o radargrama correspondente ao perfil 2 da Figura 92, sobre o qual foram colocados os valores obtidos para o espaçamento entre os varões. A Figura 96 representa um esboço relativo à zona da parede onde foi utilizado o GPR, com indicação dos varões horizontais e o respectivo espaçamento.

Como se pode constatar na Figura 95, as distâncias entre as armaduras apresentam valores bastante próximos, de 0,10 metros, 0,11 metros e 0,12 metros.

A variabilidade entre os valores obtidos, ainda que pequena, poderá dever-se, eventualmente, a algum erro durante a execução da parede no que se refere à colocação dos varões ou, porventura, talvez a um deslocamento da armadura durante o processo de construção ou de betonagem, uma vez que os varões deveriam apresentar o mesmo espaçamento entre si.



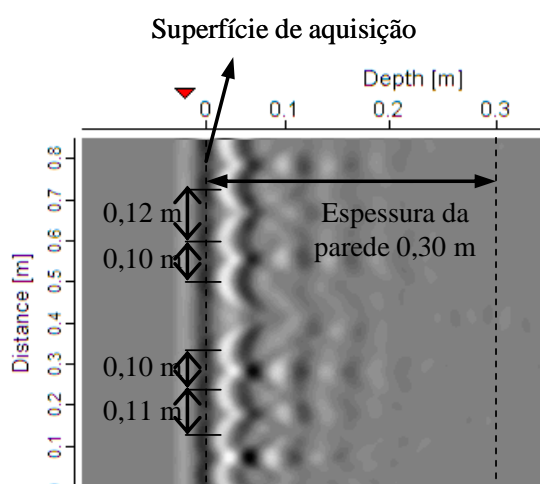


Figura 95 – Perfil 2.

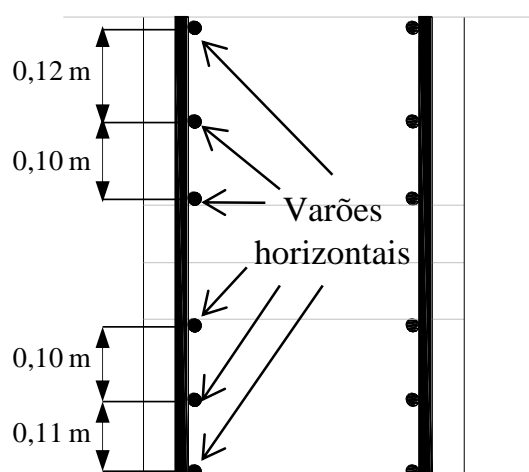


Figura 96 – Zona de aplicação do GPR e espaçamento entre varões horizontais.

Adicionalmente, com o intuito de verificar o alinhamento das armaduras horizontais, foi realizado um perfil vertical no alinhamento do perfil 8 da Figura 92. Este foi efectuado com um comprimento de 1,20 metros de modo a contemplar um maior número de varões. Como se pode observar na Figura 97, os resultados são satisfatórios, uma vez que as armaduras se encontram perfeitamente alinhadas, conforme se representa a tracejado.

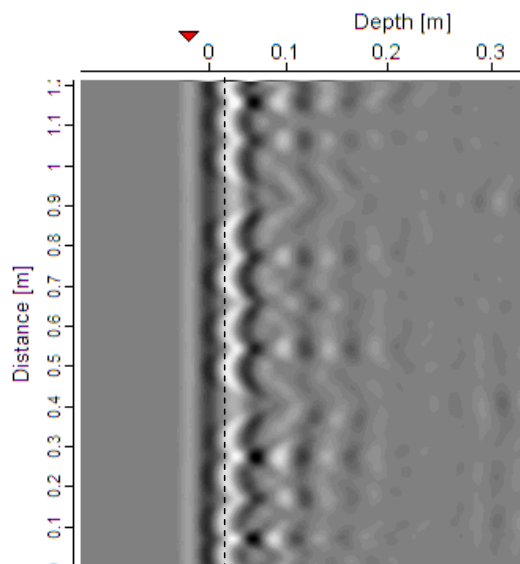


Figura 97 – Alinhamento das armaduras horizontais.



Após o estudo dos varões horizontais procedeu-se à análise dos varões verticais. A observação dos perfis horizontais (10 a 18 da Figura 92) permitiu constatar que os radargramas são bastante semelhantes entre si.

Na Figura 98 é apresentado o perfil 12 da Figura 92 com a indicação da distância de separação entre armaduras, medida através do pico das hipérboles, que corresponde aos eixos dos varões. Como se pode verificar neste radargrama, os afastamentos entre os varões verticais são de 0,13 metros, 0,90 metros e 0,10 metros. As diferenças de espaçamento entre os varões de aço poderão igualmente resultar de algum erro durante a construção da parede em termos de colocação de armadura, ou a um eventual deslocamento durante o processo de construção ou de betonagem.

No radargrama da Figura 98 é possível também verificar pela linha a tracejado que as armaduras verticais não se encontram alinhadas.

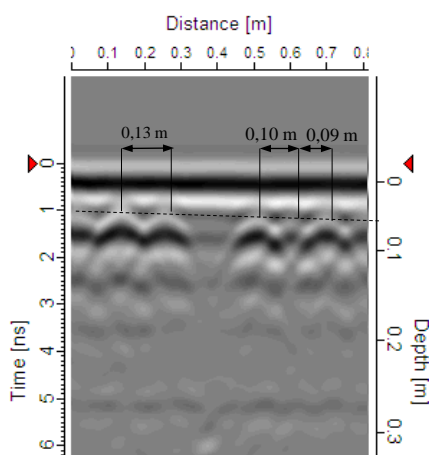


Figura 98 – Perfil 12 com a identificação do afastamento entre os varões verticais.

O perfil representado na Figura 99 foi realizado na horizontal, na mesma linha do perfil 16 identificado na Figura 92, porém com um comprimento superior. Neste radargrama torna-se evidente, pela linha representada a tracejado, que as armaduras não se encontram devidamente alinhadas. Porém, esta situação é apenas verificada até aproximadamente 90 centímetros do início do perfil. Além do desalinhamento dos varões a reflexão não é tão acentuada, e deste modo, poderá ter existido deterioração do material. A diferença de intensidade no sinal ao nível das armaduras poderá dever-se à presença de danos, corrosão ou heterogeneidade (provocada pela corrosão ou não).

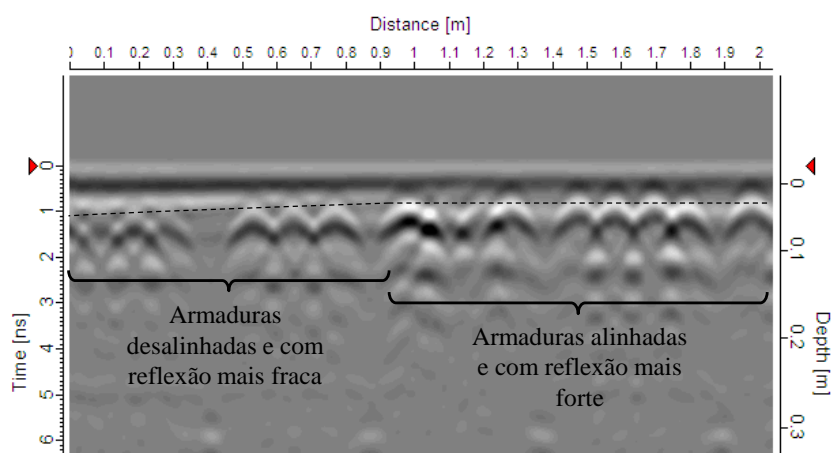


Figura 99 – Alinhamento dos varões verticais.

### 3.4.3. Conclusões

Nos dois casos de estudo referentes às paredes o GPR permitiu estimar a velocidade média de propagação do sinal.

No primeiro caso de estudo, verificou-se o aparecimento de hipérboles na superfície oposta que poderão dever-se ao cruzamento do GPR com as juntas horizontais. Neste estudo, o georadar permitiu também localizar um dos pregos com bucha plástica e detectar alguns vazios.

No segundo caso prático relativo à parede de betão, o georadar possibilitou determinar o espaçamento entre as armaduras horizontais e verticais e verificar o alinhamento dos varões.

De facto, a aplicação da antena de 1600 MHz foi a mais adequada para os estudos efectuados nas paredes uma vez que permitiu obter dados com boa resolução.

## 3.5. Aplicação em lajes de betão armado

O GPR foi aplicado numa laje de betão armado do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar e na laje do pavimento do mesmo laboratório. Em ambas as situações práticas foi utilizada a antena de 1600 MHz.

### 3.5.1. Caso de estudo prático 1

#### 3.5.1.1. Local em estudo

A Figura 100 mostra a laje de betão armado do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar, onde foi aplicado o GPR. Como se pode constatar, nesta figura a laje contém cilindros de metal embutidos no seu interior, tal como a parede de betão armado do subcapítulo 3.4.2. Contudo, a laje de betão apresenta uma espessura de 0,60 metros (Figura 101).



Figura 100 – Laje de betão armado.

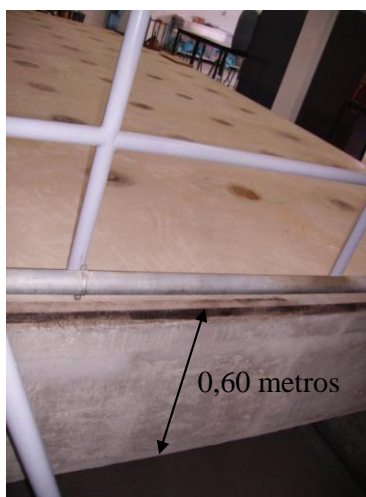


Figura 101 – Espessura da laje de betão armado.

Em planta, a laje apresenta as dimensões indicadas na Figura 102. No entanto, o estudo restringiu-se apenas a uma pequena área.

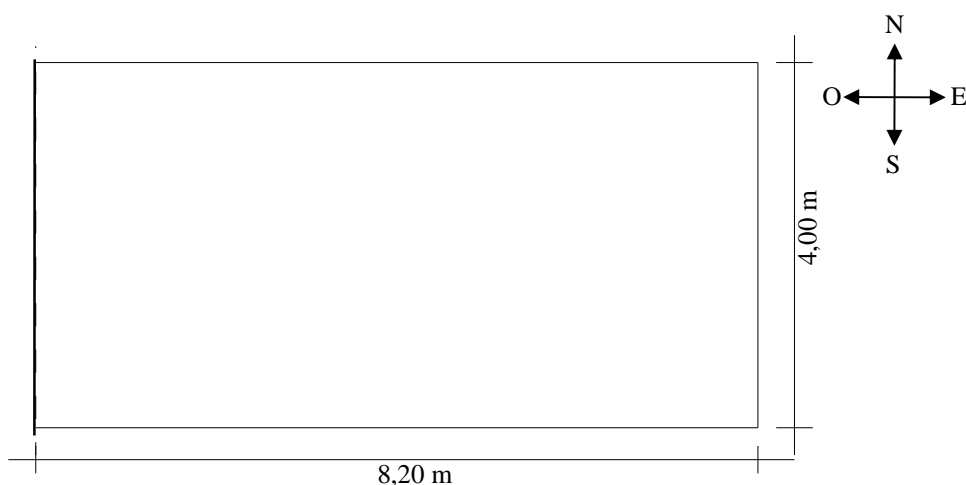


Figura 102 – Dimensões em planta da laje de betão armado.

### 3.5.1.2. Aplicação do georadar

O georadar foi aplicado na laje de betão armado numa pequena área entre os cilindros, dado que em torno destes existia uma ligeira depressão que não permitia manter o contacto com a roda do carrinho onde está instalado o odómetro e a superfície.

Os perfis foram efectuados paralelamente entre si segundo a grelha que serviu de base, conforme ilustra a Figura 103.

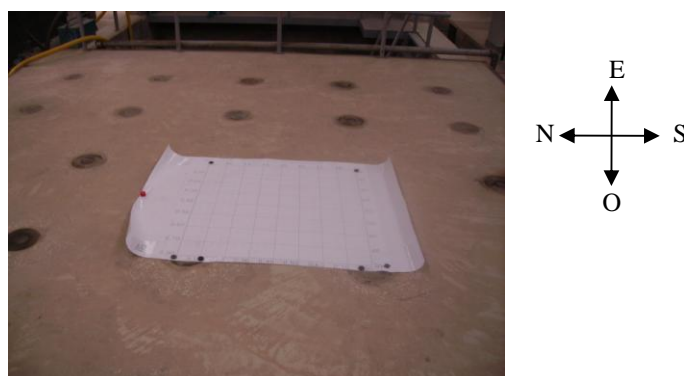


Figura 103 – Grelha utilizada no estudo efectuado na laje.

Neste estudo foi utilizada a antena de 1600 MHz, para obter uma resolução alta que permitisse estudar o espaçamento entre armaduras e verificar o seu alinhamento.

Foram realizados 5 perfis verticais (1 a 5) e 9 perfis horizontais (6 a 14), como se pode observar na Figura 104.

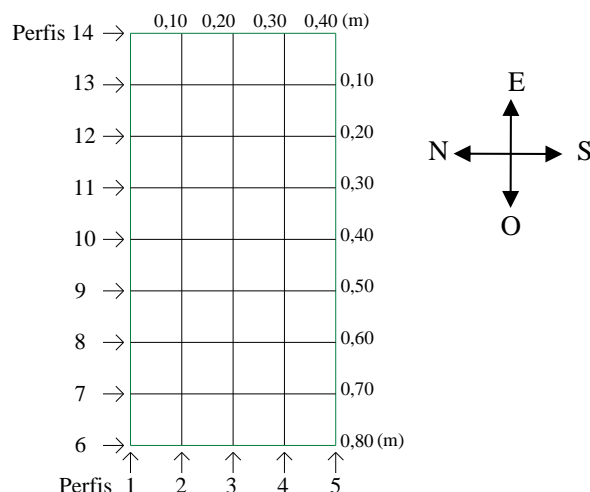


Figura 104 – Localização dos perfis verticais (1 a 5) e dos perfis horizontais (6 a 14).

Os perfis verticais têm 80 centímetros de comprimento enquanto que os perfis horizontais têm 40 centímetros. Os perfis foram adquiridos com uma frequência de amostragem de 33654 MHz, janela temporal de 18 nanossegundos e intervalo entre traços de 4 milímetros.

A hipótese de colocar uma chapa de metal na superfície oposta revelou-se de difícil exequibilidade, pelo que não foi possível determinar a velocidade média de propagação do sinal na laje.

### 3.5.1.3. Tratamento e análise de resultados

Para o processamento dos perfis apresentados foi utilizado o mesmo procedimento aplicado nos radargramas correspondentes à parede de betão. Aplicaram-se os filtros *DC removal*, *band pass* e ajustou-se a superfície de aquisição pelo primeiro pico de amplitude positiva. Aplicou-se também o filtro *running average* e efectuou-se um ajuste do contraste.

Os perfis obtidos na vertical são bastante idênticos. A título de exemplo apresenta-se o perfil 2 na Figura 105. Neste radargrama verificou-se a presença de 5 varões

devidamente alinhados, conforme a linha a tracejado na imagem. O afastamento entre os varões foi medido pelo centro das hipérboles. Os espaçamentos obtidos foram de 0,10 m, 0,13 m, 0,11 m e 0,14 m.

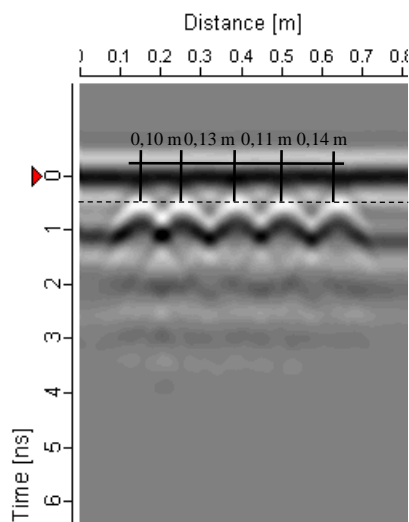


Figura 105 – Perfil 2.

Os radargramas verticais são bastante semelhantes entre si, no entanto apenas foi possível medir o afastamento entre três varões visto que os perfis têm um comprimento apenas de 40 centímetros. No radargrama da Figura 106 foram detectados três varões que apresentam afastamentos entre si de 0,13 e 0,14 metros.

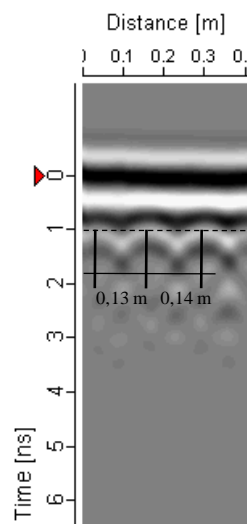


Figura 106 – Perfil 11.

### 3.5.2. Caso de estudo prático 2

#### 3.5.2.1. Local em estudo

O georadar foi aplicado na laje do pavimento do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar, na zona assinalada a tracejado na Figura 107.

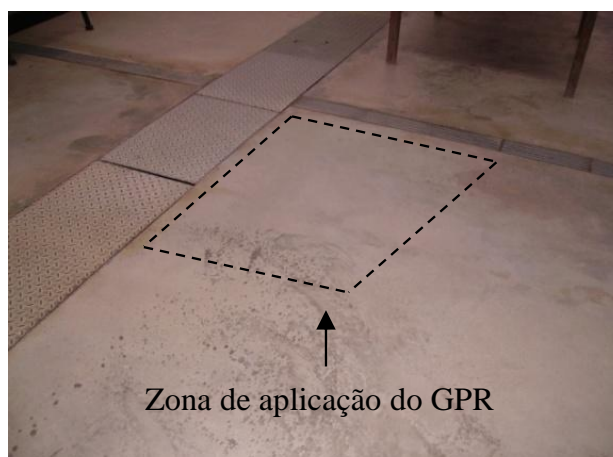


Figura 107 – Local de aplicação do GPR.

#### 3.5.2.2. Aplicação do georadar

O GPR foi aplicado na laje do pavimento para verificar o alinhamento das armaduras e o afastamento entre as mesmas, e para tal, foi utilizada a antena de 1600 MHz para obter uma resolução elevada.

O esquema de ensaio consistiu na aplicação do georadar sobre uma grelha para garantir que os perfis ficassem equidistantes. Foram efectuados 11 perfis longitudinais (de 1 a 11) e 11 perfis transversais (de 12 a 22), conforme indica a Figura 108.

Os parâmetros de ensaio dos perfis realizados foram idênticos aos do estudo anterior.

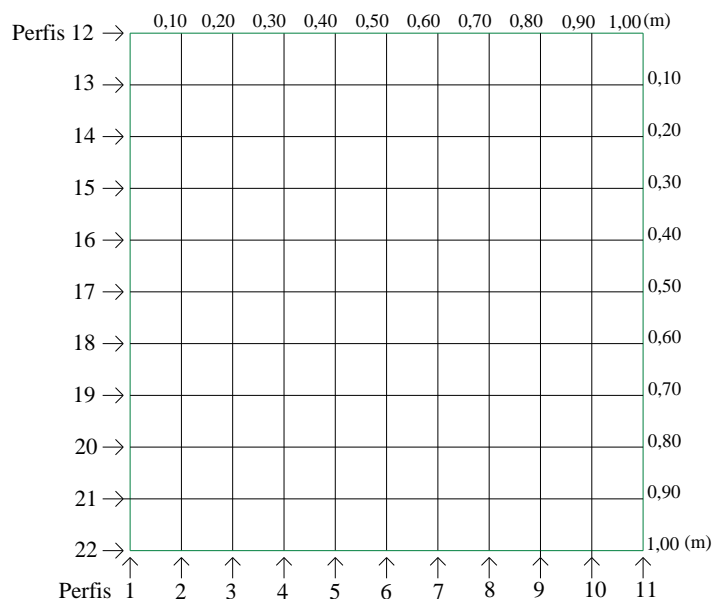


Figura 108 – Localização dos perfis longitudinais (1 a 11) e transversais (12 a 22).

### 3.5.2.3. Tratamento e análise de resultados

Nas Figuras 109 e 111 são apresentados respectivamente, os perfis 9 e 18 da Figura 108. Em ambos os perfis foram utilizados os filtros *DC removal*, *band pass* e *running average*. Contudo, constatou-se que o sinal correspondente às hipérboles era muito fraco, pelo que se introduziu um filtro de ganho (*time varying gain*) e o filtro *background removal* para as evidenciar (Figuras 110 e 112).

Os perfis longitudinais (de 1 a 11) são bastante semelhantes entre si. A título de exemplo apresenta-se o perfil 9 (Figuras 109 e 110), no qual se pode verificar que as armaduras se encontram alinhadas e apresentam afastamentos de 0,20 e 0,21 metros.



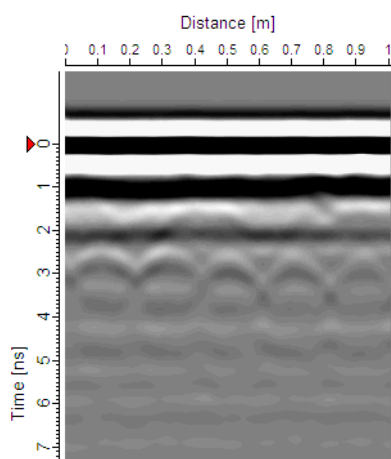
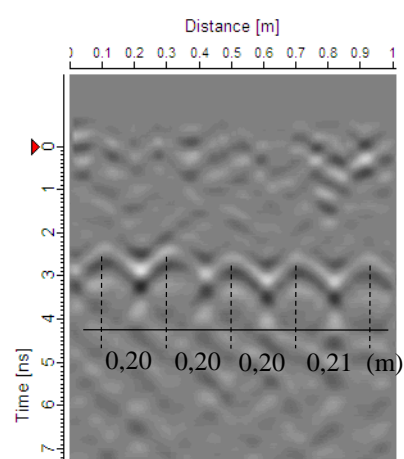


Figura 109 – Perfil vertical 9.

Figura 110 – Perfil vertical 9 com aplicação dos filtros de ganho e *background removal*.

Porém, no perfil transversal 18 (Figuras 111 e 112) constata-se que as armaduras não estão alinhadas (linha a tracejado). Neste perfil foi possível medir apenas dois afastamentos entre armaduras (através dos picos das hipérbolas) de 0,17 e 0,18 metros.

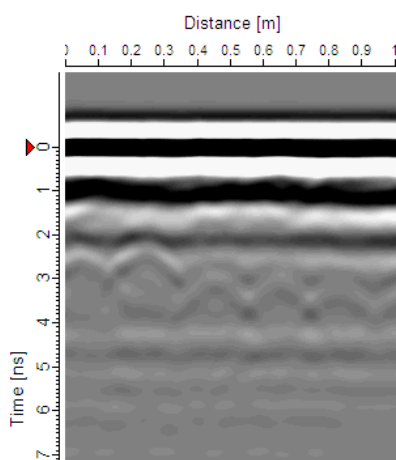
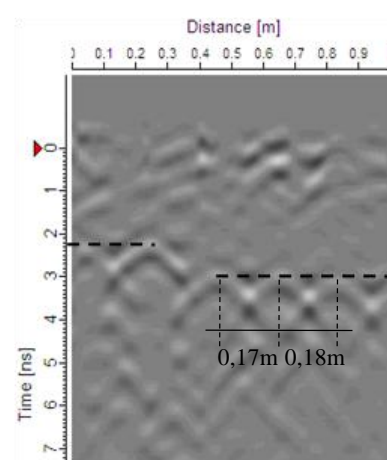


Figura 111 – Perfil transversal 18.

Figura 112 – Perfil transversal 18, após aplicação dos filtros de ganho e *background removal*.

### 3.5.3. Conclusões

A antena de 1600 MHz foi de facto a mais apropriada para a realização destes estudos em que se pretendia estudar as armaduras.

Na laje de ensaios foram identificados os varões, o espaçamento entre os mesmos e verificou-se também o alinhamento das armaduras.

Na laje do pavimento do Laboratório de Engenharia Civil correspondente ao segundo caso prático, constatou-se que as armaduras não se encontravam devidamente alinhadas e foi possível determinar apenas dois afastamentos entre armaduras.

### **3.6. Aplicação ao caso de estudo da ponte de Vila Fria**

#### **3.6.1. Local em estudo**

A ponte de Vila Fria foi construída recentemente por iniciativa da Câmara Municipal de Felgueiras com a finalidade de substituir uma antiga passagem sobre o Rio Vizela, por uma nova ponte de alvenaria de pedra de granito no mesmo local (Costa, 2007). Este projecto foi apoiado pela FEUP e pelo Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Costa, 2007), que o aproveitou para fins científicos, no contexto do qual a ponte foi instrumentada para monitorização do seu comportamento na fase de construção e serviço.

A construção desta ponte constituiu o tema da dissertação de mestrado de (Costa, 2007), foi um dos casos práticos estudados na dissertação de doutoramento de (Costa, C., 2009) e constituiu tema de artigos de alguns autores, como sejam, (Costa *et al.*, 2005), (Arêde *et al.*, 2007) e (Costa *et al.*, 2007).

A aplicação do georadar na nova ponte de Vila Fria suscitou particular interesse por se tratar de uma ponte recente em arcos de alvenaria de pedra e também pelo facto de existir um conjunto alargado de informação sobre este projecto.

Nos parágrafos seguintes tecem-se algumas considerações sobre os aspectos relativos à geometria da ponte e materiais utilizados, que pareceram relevantes para uma melhor interpretação dos dados obtidos por aplicação do GPR. Esta informação foi obtida essencialmente através das dissertações dos autores (Costa, 2007) e (Costa, C., 2009), mencionadas anteriormente.

A Figura 113 representa uma fotografia aérea da nova ponte de Vila Fria, mostrando-se nas Figuras 114 (a) e 114 (b), respectivamente, as vistas dos alçados de montante e jusante, obtidas no local durante os ensaios de GPR.



Figura 113 – Vista aérea da nova ponte de Vila Fria (Costa, 2007).



(a)



(b)

Figura 114 – Vista da ponte de Vila Fria, do alçado montante (a) e do alçado jusante (b).

De acordo com Costa (2007), a ponte de Vila Fria tem um comprimento total de cerca de 60 metros e os cinco arcos constituintes têm a mesma espessura de 0,80 metros, no entanto, apresentam diferentes formas, sendo o arco central mais elevado. O tabuleiro da ponte (Figura 115) tem 6 metros de largura e é constituído por um lajedo regular de pedra granítica com uma espessura de 0,20 metros (Costa, 2007).



Figura 115 – Tabuleiro da ponte.

Com base em Costa (2007), o guarda-corpos tem 0,90 metros de altura e 0,20 metros de espessura e o encaixe das pedras é do tipo macho-fêmea. Junto ao guarda corpos de jusante existe uma calha técnica com várias caixas de visita (Figura 116) e que permite conduzir a cablagem do sistema de monitorização no seu interior até ao armário técnico (Figura 117) (Costa, 2007).



Figura 116 – Aberturas da calha técnica (Costa, 2007).



Figura 117 – Armário técnico.

As Figuras 118 e 119 mostram, respectivamente, o corte transversal da ponte e o alçado montante com a identificação dos arcos e dos pilares adoptada no contexto dos trabalhos anteriormente referidos (Costa, 2007) e (Costa, C., 2009).

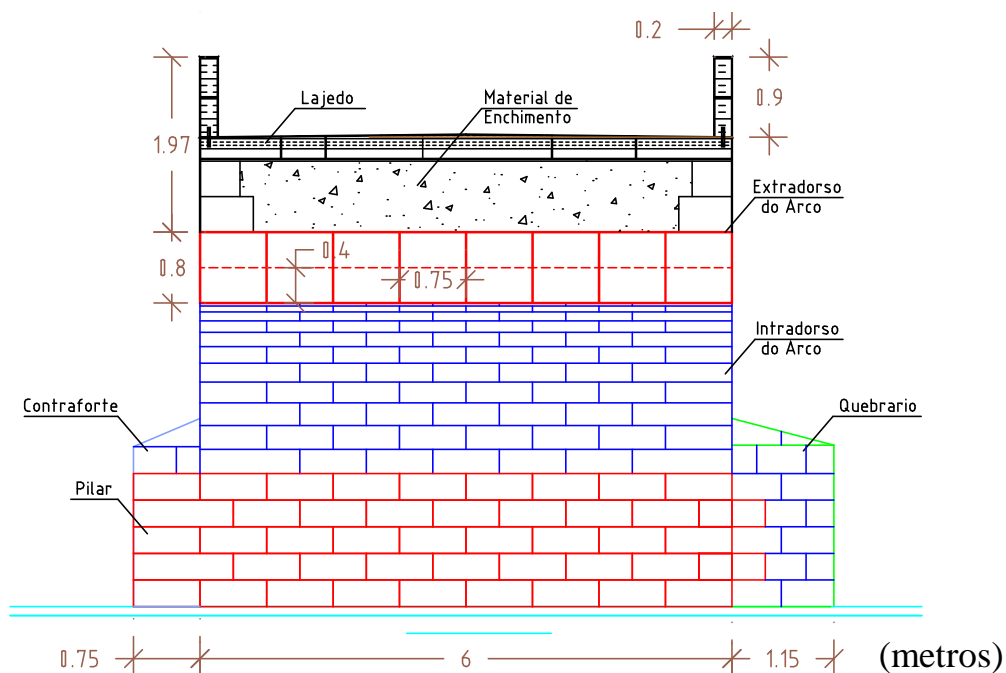


Figura 118 – Corte transversal da ponte (Costa *et al.*, 2001).

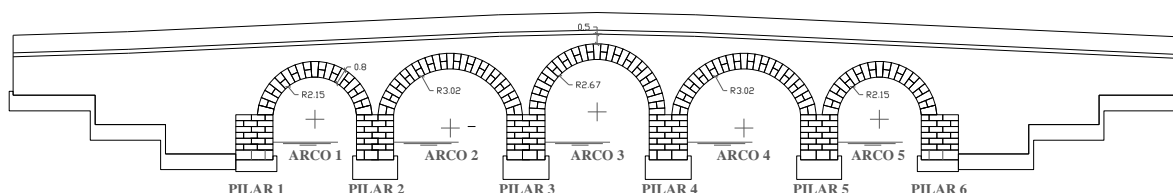


Figura 119 – Alçado montante da ponte de Vila Fria, adaptado de (Costa, C., 2009).

Na Tabela 8 estão resumidos os valores correspondentes ao vão, flecha e espessura dos arcos, altura do pilar e largura em planta dos pilares, espessura do enchimento na zona do coroamento dos arcos, da camada de sub-base, do pavimento e dos tímpanos (Costa, C., 2009).

Dado que geometria da ponte é simétrica, sendo que o eixo de simetria passa pelo centro do arco 3, as dimensões dos arcos 4 e 5 são idênticas às dos arcos 2 e 1, respectivamente. As dimensões dos pilares 4, 5 e 6 são análogas às dos pilares 3, 2 e 1, respectivamente (Costa, C., 2009).



Tabela 8 – Dimensões dos elementos da ponte de Vila Fria (Costa, C., 2009).

## (a) Arcos.

Arcos	Vão (m)	Flecha (m)	Espessura (m)
Arco 1	4,30	2,15	0,80
Arco 2	5,80	2,90	0,80
Arco 3	5,30	2,65	0,80

## (b) Pilares.

Pilares	Altura do Pilar (m)	Largura em Planta do Pilar (m)
Pilar 1	2,00	2,15
Pilar 2	2,00	2,90
Pilar 3	2,00	2,65

## (c) Outros elementos.

Elementos	Espessura (m)
Enchimento no coroamento dos arcos (valor mínimo)	0,51
Camada de sub-base	0,13
Pavimento (lajedo de pedra)	0,20
Tímpanos (valor mínimo)	0,80

A estrutura de alvenaria dos arcos, pilares, tímpanos e talhamares é constituída por blocos de pedra de granito e as juntas são preenchidas com uma argamassa pronta à base de cal fornecida pela Secil Martingança (Costa, 2007).

Relativamente ao material de enchimento (Figura 120) colocado no espaço entre os muros tímpano e acima dos arcos e pilares, este é composto por *tout-venant* na camada superior, ao qual foi adicionado uma reduzida percentagem de cimento *portland* e água de modo a efectuar a ligação de todos os materiais (Costa, 2007).



Figura 120 – Material de enchimento (Costa, 2007).

A Figura 121 ilustra a impermeabilização do tabuleiro realizada sob o pavimento e constituída por uma tela impermeabilizante sobre a qual se efectuou uma camada de “traço seco” de modo a assentar o lajedo (Costa, 2007).



Figura 121 – Impermeabilização do tabuleiro (vista geral) (Costa, 2007).

### 3.6.2. Aplicação do georadar

O georadar foi utilizado na nova ponte de Vila Fria com objectivo de verificar as potencialidades deste equipamento em pontes em arco de alvenaria, determinar a espessura do lajedo do pavimento e dos arcos, determinar a posição medida na horizontal do centro do extradorso da aduela de fecho dos arcos e identificar zonas com humidade. Para o efeito foram realizadas medições com o GPR perfazendo um total de 6 perfis longitudinais sobre o tabuleiro posicionados na direcção transversal como se indica na Figura 122.

Conforme se indica na Figura 122 os perfis 1, 3 e 5 foram efectuados a 1,40 metros de distância do guarda-corpos de jusante e os perfis 2, 4 e 6 foram realizados a 1,90 metros de distância do guarda-corpos de montante. Todos os perfis foram efectuados no sentido de poente para nascente.

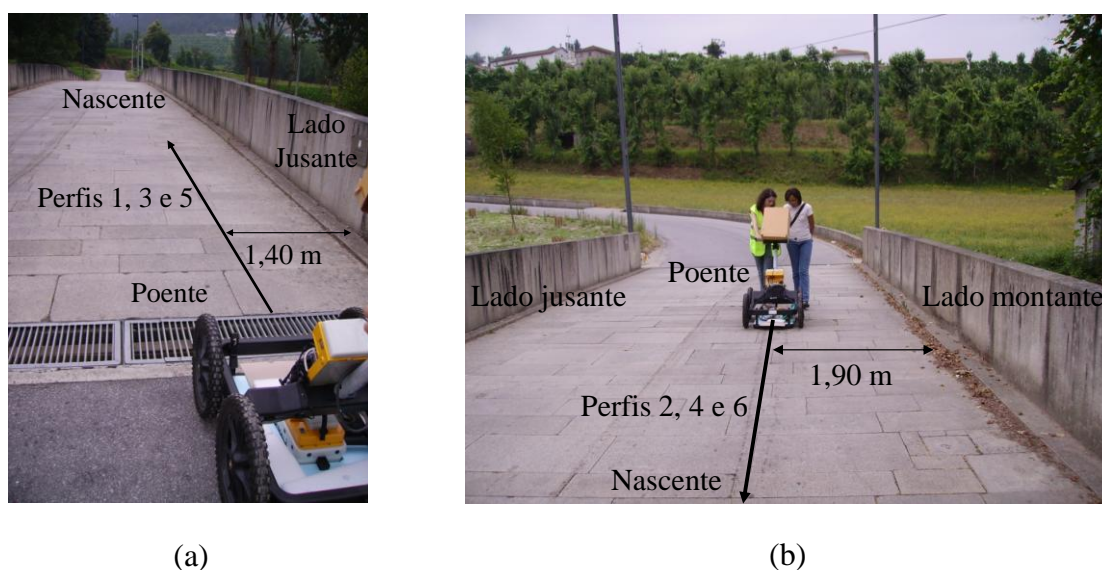


Figura 122 – Perfis efectuados no tabuleiro da ponte, do lado jusante (a) e do lado montante (b).

A Tabela 9 resume os parâmetros dos perfis efectuados no tabuleiro da ponte, especificamente, a antena utilizada, o comprimento, a frequência de amostragem, a janela temporal, intervalo entre traços e a posição do perfil na secção transversal.

Tabela 9 – Parâmetros dos perfis efectuados.

Perfis	Antena (MHz)	Comprimento (m)	Frequência de amostragem (MHz)	Janela temporal (ns)	Intervalo entre traços (m)	Posição na secção transversal
1	800	60	12045	39	0,008	1,4 m jusante
2	800	60	12045	39	0,008	1,9 m montante
3	500	60	7608	107	0,020	1,4 m jusante
4	500	60	7608	107	0,020	1,9 m montante
5	250	70	5489	103	0,039	1,4 m jusante
6	250	70	5489	103	0,039	1,9 m montante

### 3.6.3. Tratamento e análise de resultados

Os perfis 1 e 2 foram efectuados com antena de 800 MHz de modo a obter uma resolução que permitisse determinar a espessura do lajedo de granito.

O perfil 1 ilustrado na Figura 123 mostra um troço do radargrama, entre os 21 metros e os 28 metros. Neste radargrama foram aplicados os filtros *DC removal* e *band pass*.



Aplicou-se também o filtro *time varying gain* que permitiu evidenciar a superfície oposta do lajedo e o filtro *running average* que tornou o radargrama mais nítido. Pela observação deste perfil após o processamento, verificou-se a presença de um sinal bastante horizontal e regular, aproximadamente aos 3,10 nanossegundos, que poderá corresponder à interface entre a superfície inferior do lajedo e a camada de sub-base. A par disto, constata-se que abaixo da referida interface são produzidas muitas reflexões devido ao material de enchimento o que está de acordo com a constituição heterogênea do mesmo.

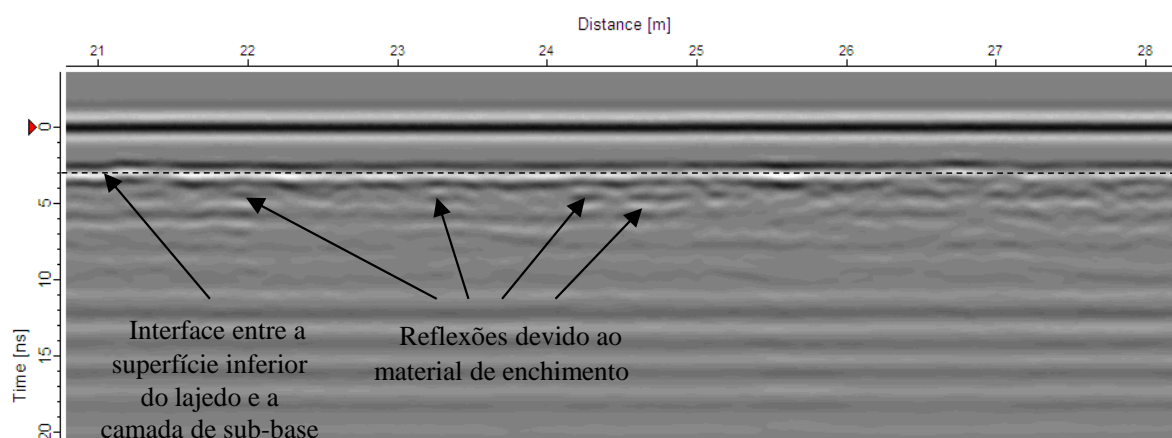


Figura 123 – Radargrama do perfil 1 (entre 21 e 28 m).

Neste radargrama verificou-se que o sinal demorou cerca de 3,10 nanossegundos entre a superfície de aquisição e a interface correspondente à face inferior do lajedo.

Atendendo que na Tabela 1, a velocidade de propagação no granito quando este se apresenta seco varia entre  $1,20 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1,50 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  e tendo em conta a expressão

$$v = \frac{2h}{t}, \text{ para } 3,10 \text{ nanossegundos, obtém-se valores para a espessura do lajedo entre } 18,60$$

e 23,25 centímetros, consoante o valor de velocidade admitido. Assim sendo, os resultados podem considerar-se satisfatórios, uma vez que o lajedo apresenta uma espessura real de 20 centímetros, situando-se entre este intervalo de valores aferidos.

Para determinar a espessura dos arcos foram realizados os perfis 3 e 4 com a antena de 500 MHz que apresenta uma resolução média/alta e atinge uma profundidade compreendida entre 1 metro a 4 metros (Tabela 3).

Nas Figuras 124 e 125 são apresentados respectivamente, dois trechos do perfil 4 (Tabela 9), entre os 10 e os 26 metros e entre os 26 e os 42 metros. Para o processamento

destes radargramas seguiu-se o mesmo procedimento adoptado para o perfil apresentado anteriormente (Figura 123). Porém, no caso do perfil 4, a aplicação do filtro *time varying gain* teve como objectivo aumentar a amplitude dos sinais dos arcos que se encontravam a uma maior profundidade. Foi também aplicada outra função de ganho por meio do filtro *automatic gain control* que permitiu igualmente evidenciar os arcos.

Como se pode observar na Figura 124 estão representados os arcos 1 e 2 e na Figura 125 apresentam-se os arcos 3 e 4.

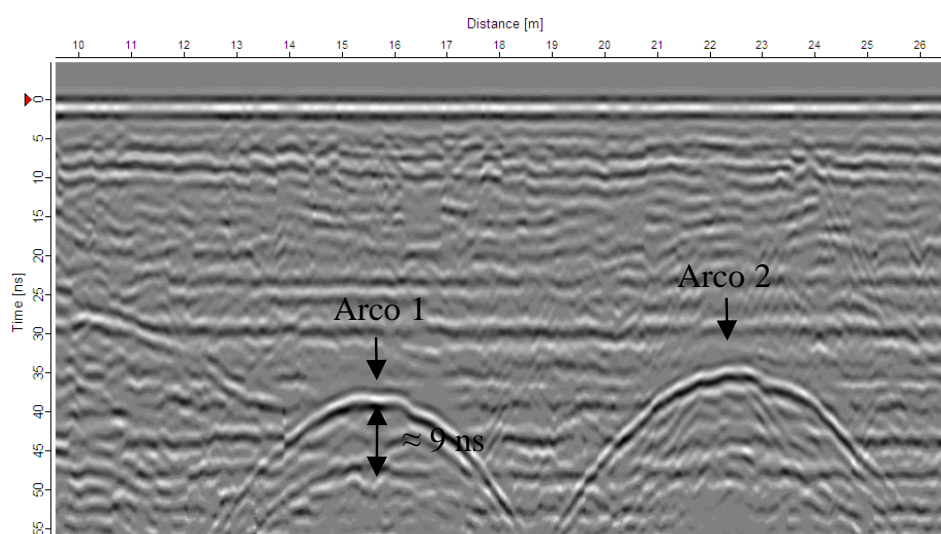


Figura 124 – Perfil 4 (entre os 10 e os 26 metros).

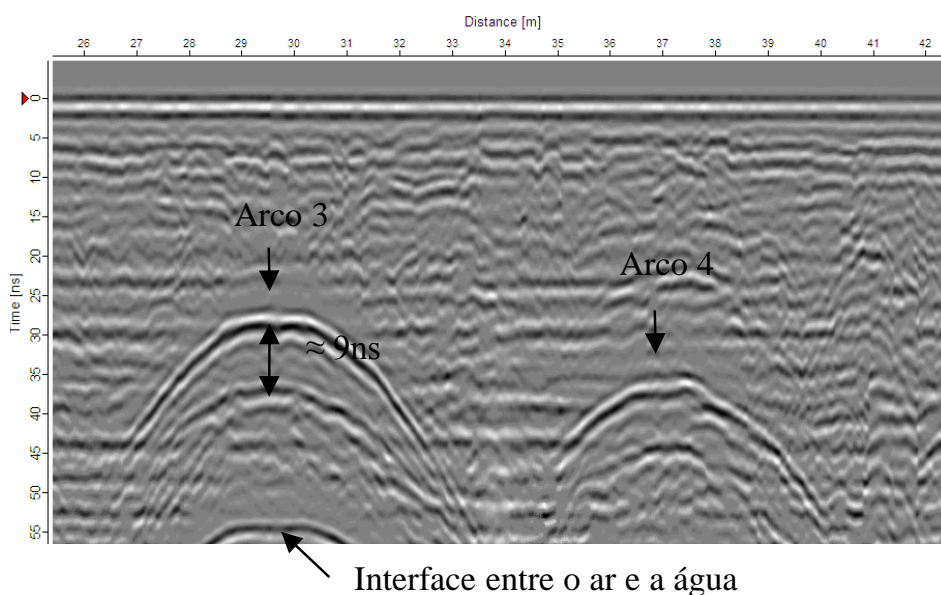


Figura 125 – Perfil 4 (entre os 26 e os 42 metros).

Após a análise dos radargramas anteriores verificou-se que o sinal demora aproximadamente 9 nanossegundos a atravessar a distância entre o extradorso e o intradorso do arco, medida ao centro do arco. Tal como na situação anterior, recorreu-se à Tabela 1 que indica os valores da velocidade de propagação para o granito. Neste estudo, também se considerou os valores para o granito seco, dado que o nível da água é bastante baixo e não atinge a parte superior do extradorso do arco, como se pode constatar pela observação das Figuras 113 e 114.

Atendendo aos valores de velocidade da Tabela 1,  $1,20 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1,50 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  e ao valor obtido de 9 nanossegundos, aplicou-se a fórmula  $v = \frac{2h}{t}$  e obtiveram-se, respectivamente, o valor mínimo de 54 centímetros e o valor máximo de 68 centímetros para a espessura dos arcos. De acordo com a Tabela 8, na realidade os arcos apresentam uma espessura de 80 centímetros, e mesmo considerando o maior valor de velocidade ( $1,50 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ), obtém-se um erro de 17,65%.

O facto da espessura dos arcos ser determinada somente ao centro dos mesmos (Figuras 124 e 125), poderá ter levado a este nível de erro, para além disso, o procedimento é geralmente mais exigente em termos de rigor nas medições estando por isso mais susceptível à ocorrência de erros.

No perfil 4 que se pode ver na Figura 126 (entre os 13 e os 32 metros) e na Figura 127 (entre os 24 e os 43 metros) também se verificou a existência de uma mancha de sinais mais atenuada localizada por cima dos arcos de 1 a 4. O arco 5 não foi representado por não apresentar boa resolução. Como foi referido anteriormente, a presença de humidade leva a que haja atenuação do sinal. Apesar do sistema de impermeabilização (Figura 121) e drenagem ter sido realizado para limitar a entrada de água no interior da ponte poderá ter entrado água pelo pavimento com saída pelo intradorso dos arcos. A eventual presença de humidade na zona superior ao coroamento dos arcos, poderá resultar da percolação de água pelo interior dos poros do material de enchimento.

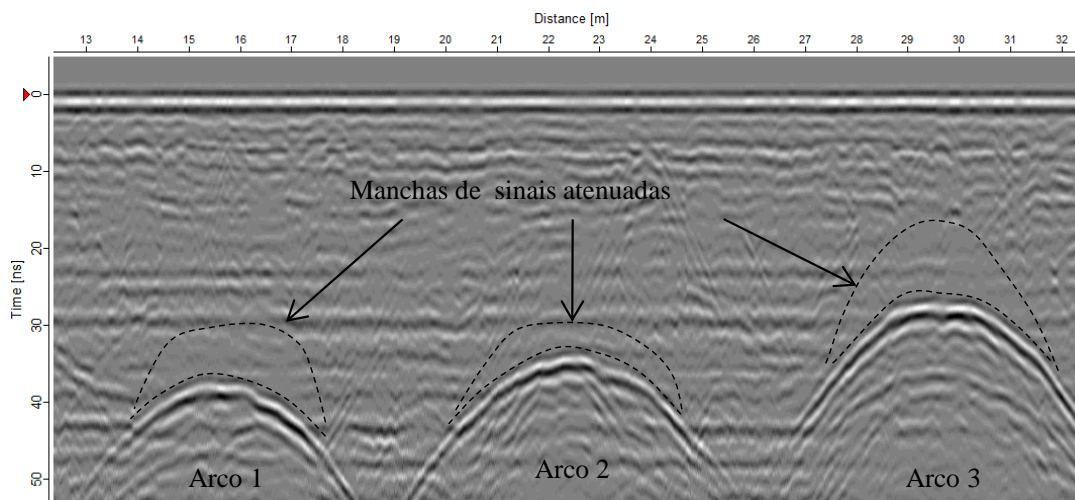


Figura 126 – Perfil 4 (entre os 13 e os 32 metros) com identificação dos arcos e das manchas atenuadas.

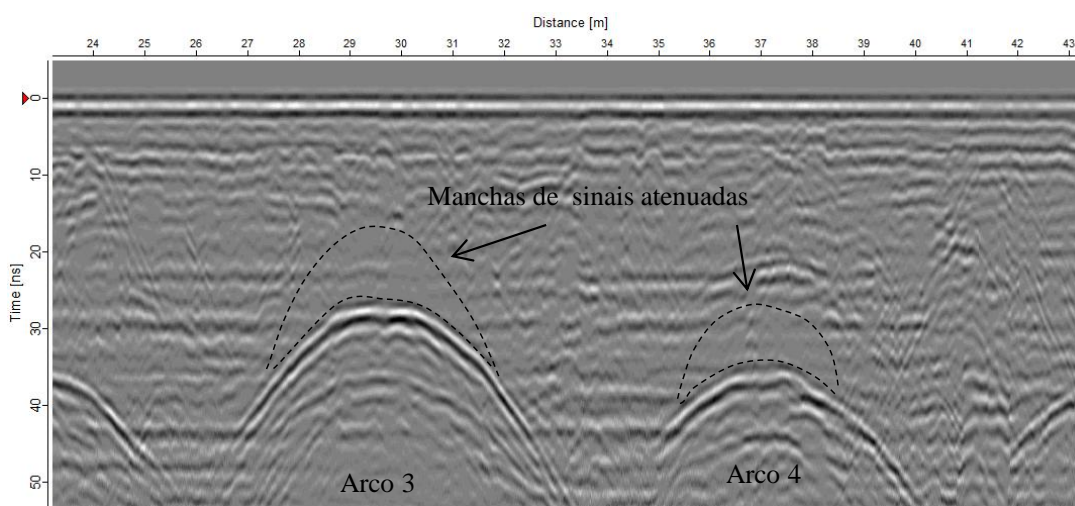


Figura 127 - Perfil 4 (entre os 24 e os 43 metros) com identificação dos arcos e das manchas atenuadas.

O perfil 6 representado na Figura 128 foi obtido com a antena de 250 MHz que reúne num mesmo troço (entre 18 e 51 metros) os cinco arcos da ponte. Importa salientar que a medição horizontal não depende do tipo de antena, mas da correcta calibração da roda de medição. Este perfil foi utilizado para determinar as posições correspondentes ao centro do extradorso da aduela de fecho dos arcos (medidas na escala horizontal) obtidas com georadar (Figura 128) e comparar com os valores reais que constam na Figura 129. Este perfil também permite verificar que o arco central (arco 3) se encontra mais próximo da

superfície seguindo-se os arcos 2 e 4, e finalmente os arcos 1 e 5, dados estes que estão de acordo com os da Figura 119.

Verifica-se ainda que o registo obtido no perfil 6 permite detectar a interface entre o ar e a água, como se assinala na Figura 128.

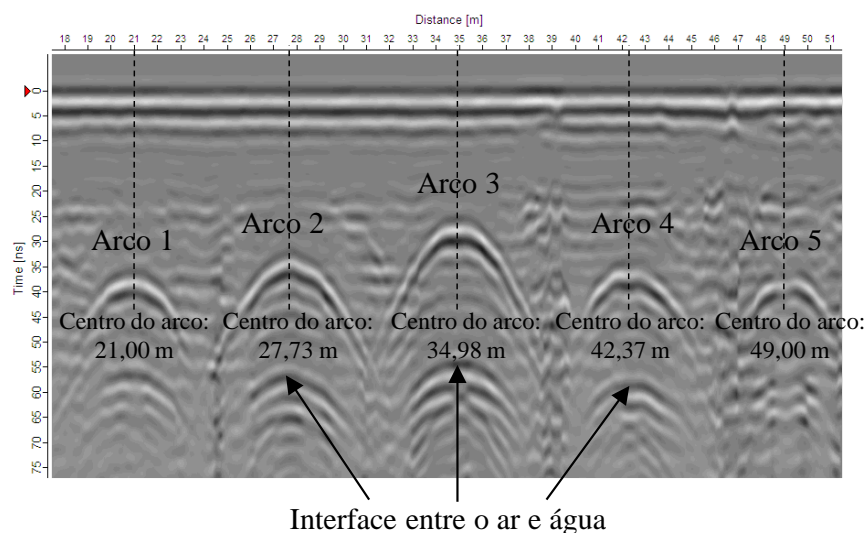


Figura 128 – Perfil 6 (entre 18 e 51 metros) obtido com a antena de 250 MHz.

Na Figura 129 estão identificadas as posições do eixo dos cinco arcos de acordo com o projecto original. Tendo em conta que o perfil 6 se iniciou a 5,2 metros antes da entrada na ponte, as distâncias no perfil longitudinal são referidas a essa posição inicial.

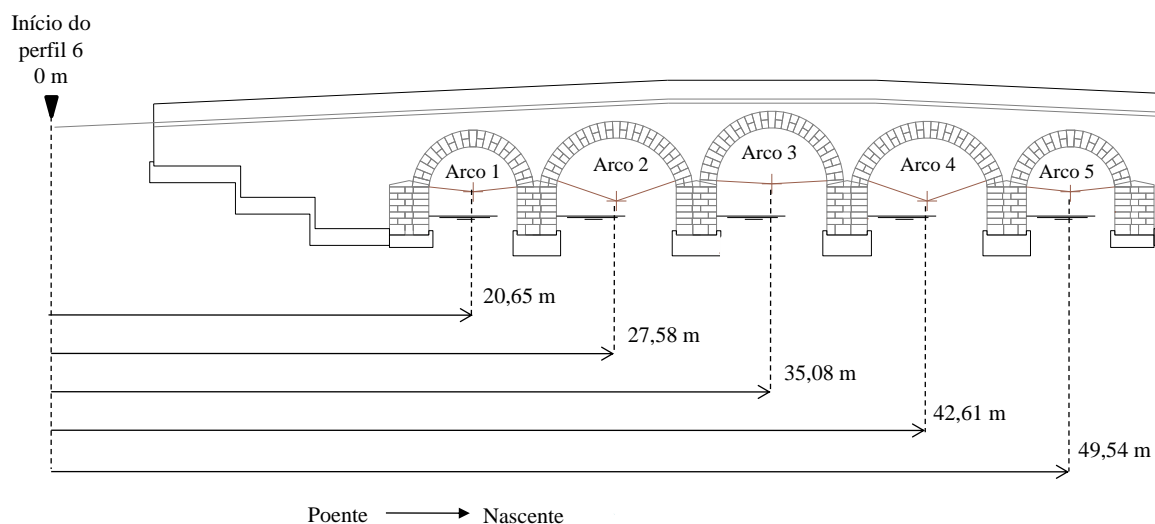


Figura 129 – Identificação da posição do centro do extradorso dos arcos, adaptado de (Costa *et. al*, 2001).

Na Tabela 10 são apresentadas para os cinco arcos da ponte, as posições do eixo dos arcos no perfil longitudinal, aferidas com base nos resultados que constam na escala horizontal do radargrama. Nesta tabela são confrontados os resultados do georadar com os do projecto incluindo-se também o correspondente erro (em percentagem). Como se pode constatar na Tabela 10, a utilização do georadar originou percentagens de erro, muito reduzidas, compreendidas entre 0,29% e 1,67%, o que indica que a roda de medição estava bem calibrada. Ainda que reduzido, o erro pode estar associado ao facto do percurso não ser completamente recto.

Tabela 10 – Posição do centro do extradorso dos arcos e percentagem de erro.

Arcos	Posição do centro do extradorso da aduela de fecho do arco no perfil longitudinal (m)		Erro (%)
	Georadar	Projecto	
Arco 1	21,00	20,65	1,67
Arco 2	27,73	27,58	0,54
Arco 3	34,98	35,08	0,29
Arco 4	42,37	42,61	0,56
Arco 5	49,00	49,54	1,10

#### 3.6.4. Conclusões

Com este estudo constatou-se que a antena de 800 MHz foi adequada para determinar a espessura do lajedo e verificar a presença do material de enchimento.

A antena de 500 MHz pode ser utilizada para obter a espessura dos arcos, no entanto, o procedimento efectuado permitiu estimar este valor apenas na zona do coroamento, o que poderá ter levado a alguma desigualdade entre a espessura real e a obtida pelo GPR, de 17,65%. Para determinar mais facilmente a espessura dos mesmos poderiam ter sido efectuados perfis com uma antena de maior frequência (800 MHz ou 1600 MHz) a passar directamente pelo intradorso do arco. No caso de ter sido adoptado este procedimento, poder-se-ia determinar a espessura do arco em todos os pontos do perfil e deste modo os resultados seriam mais precisos. Todavia, a hipótese de efectuar perfis desta forma revelou-se de difícil exequibilidade. A antena de 500 MHz permitiu também identificar algumas zonas com presença de humidade.

Utilizando um perfil obtido com a antena de 250 MHz foi possível determinar a posição, no perfil longitudinal da ponte, do centro do extradorso da aduela de fecho dos arcos. Ao estabelecer a comparação com os valores obtidos pelo GPR e o projecto original constatou-se que a percentagem de erro era muito reduzida, estando compreendida entre 0,29% e 1,67%, deste modo, este equipamento é adequado para determinar a localização do eixo dos arcos.

## **4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **4.1. Conclusões gerais**

Esta dissertação apresenta uma contribuição muito significativa para estudo das potencialidades do equipamento existente no Instituto Politécnico de Tomar. Este equipamento foi utilizado em diversas situações práticas de Engenharia Civil, designadamente, aplicações em solos, em pavimentos betuminosos, em paredes (betão armado e adobe), em lajes de betão armado e numa ponte.

Nos estudos efectuados em solos, verificou-se a eficácia do georadar na determinação da profundidade da camada de aterro de regularização e na detecção da presença de material com dimensões distintas, utilizando a antena de 250 MHz.

Nas aplicações em pavimentos betuminosos, o GPR permitiu detectar a interface entre a camada de material granular e o material de aterro com a antena de 250 MHz. A antena de 800 MHz, utilizada num dos casos de estudo, permitiu detectar a interface entre a camada de betuminoso e a camada granular e entre esta e o leito do pavimento.

Quando utilizado em paredes, com a antena de 1600 MHz, o georadar existente no IPT permitiu estimar a velocidade média de propagação do sinal. Na parede de adobe, o GPR permitiu a identificação de um prego com bucha plástica e vazios existentes no seu interior, na parede de betão armado este equipamento permitiu identificar as armaduras, determinar o espaçamento entre as mesmas e verificar o seu alinhamento.

Nas aplicações em lajes de betão armado, o georadar permitiu determinar o afastamento entre armaduras e verificar o seu alinhamento, com a antena de 1600 MHz.

No estudo efectuado na ponte de Vila Fria, constatou-se que o GPR pode ser utilizado para determinar a espessura do lajedo e detectar o material de enchimento, utilizando a antena de 800 MHz. Nesta situação prática, foi possível determinar as posições correspondentes ao centro do extradorso da aduela de fecho dos arcos (medidas na escala horizontal), tendo sido obtidas margens de erro muito reduzidas. Utilizando a antena de 500 MHz foi possível detectar algumas manchas de sinal mais atenuadas na zona superior ao coroamento dos arcos que poderão dever-se à percolação de água através do material de enchimento. Embora tivesse sido escolhida a frequência de antena adequada de 500 MHz, a determinação da espessura dos arcos apenas num único ponto localizado no eixo dos



mesmos, levou a uma percentagem de erro de 17,65% no valor obtido pelo GPR relativamente ao projecto.

Ao longo desta dissertação, verificaram-se também algumas incertezas quanto à aplicação do equipamento do Instituto Politécnico de Tomar. A presença de argila e a eventual presença de água nos solos atenuou o sinal, reduzindo assim a profundidade de penetração. A irregularidade da superfície de aquisição afectou os resultados obtidos, ao introduzir ruído nos dados.

Constatou-se a importância da utilização de outros métodos de investigação não destrutivos para comparar com os dados do georadar. Este procedimento foi efectuado no segundo caso de aplicação em solos, no qual os dados de GPR foram confrontados com os do método da resistividade eléctrica, sendo os resultados obtidos bastante consistentes entre si.

A existência de informações, tais como, sondagens, relatórios e projectos, desempenharam um papel relevante ao auxiliarem a análise e a interpretação dos dados.

Em cada um dos casos práticos estudados, foi descrito o local em estudo, foram indicadas algumas considerações sobre a aplicação do georadar, e foi efectuado o tratamento e a análise de resultados.

O software utilizado para processamento dos dados não possibilitou efectuar determinadas tarefas que seriam relevantes neste trabalho. A título de exemplo, destaca-se a impossibilidade de mostrar todo o perfil numa mesma imagem, pelo que ao longo do trabalho foram sendo apresentados apenas os trechos mais significativos dos radargramas e também se salienta o facto de o último número da escala vertical correspondente à distância não aparecer em alguns dos radargramas mostrados. Devido às limitações que este software apresenta foram sentidas algumas dificuldades no processamento e interpretação dos radargramas. De facto, o software utilizado no processamento dos dados embora apresente algumas ferramentas para este efeito trata-se de um programa de aquisição de dados. No entanto, este é o único software com funções de processamento disponível no Instituto Politécnico de Tomar, sendo esta a razão pela qual foi utilizado. Posto isto, neste trabalho seria de significativa importância a utilização de um software de processamento mais apropriado, de modo a contribuir para um melhor tratamento e interpretação dos resultados apresentados.

## 4.2. Perspectivas futuras

Uma vez conhecidas as potencialidades do georadar existente no Instituto Politécnico de Tomar em diversas aplicações práticas, prevê-se a utilização deste equipamento em situações reais de Engenharia Civil, idênticas às apresentadas nestes estudos.

Na sequência deste trabalho poderão analisar-se também as potencialidades do equipamento do IPT em paredes de alvenaria de pedra. Poderá também utilizar-se o GPR em algumas pontes do concelho de Tomar, efectuando a medição da espessura dos arcos da ponte pelo intradorso, e em alguns locais no Convento de Cristo em Tomar.

Poderá executar-se um *campo de ensaios* destinado à realização de ensaios *in situ*, de modo a simular a aplicação do GPR em situações reais. Neste planeado *campo de ensaios* deverão ser colocados, a diferentes profundidades, diversos objectos em posições definidas de modo a avaliar as potencialidades e incertezas do georadar com recurso a materiais com características e localizações conhecidas. Com efeito, poderão ser colocadas tubagens de diferentes materiais, paralelas ou perpendiculares entre si, com água no seu interior ou vazias. Prevê-se também a introdução de alguns objectos de arqueologia, de modo a alargar o estudo das potencialidades e incertezas do georadar a esta área.

Outro possível desenvolvimento futuro seria a elaboração de um projecto utilizando software adequado, destinado apenas ao processamento de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D-RADAR. <<http://www.3d-radar.com>>. (Janeiro 23, 2010).

Aguiar, J. C. M. (2005). “Radar de penetração no solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, <<http://lakh.unm.edu/handle/10229/3438>>. (Outubro 15, 2009).

AL-Qadi, I. L. and Lahouar, S. (2005). “Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice.” *Construction and Building Materials*, 19, 763-772.

Aranha, P. R. A; Parizzi, M. G.; Sobreira, F. G.; Galvão, T. C. B. e Beirigo, E. A. (2006). “Aplicação do GPR na análise da estabilidade de taludes na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG.” *Revista de Geologia*, <[http://www.revistadegeologia.ufc.br/07\\_2006.pdf](http://www.revistadegeologia.ufc.br/07_2006.pdf)>. (Out. 16, 2009).

Área de Recursos Electrónicos e Apoio ao Utilizador, Biblioteca da Universidade de Aveiro (2010). “Referências bibliográficas normas e estilos, Manual Estilo ASCE.” <<http://www.ua.pt/sbidm/biblioteca/PageImage.aspx?id=12012>>. (Outubro 12, 2010).

Arêde, A., Costa, P., Costa, A., Costa, C. and Noites, L. (2007). “Monitoring and testing of a new stone masonry arch bridge in Vila Fria. Portugal.” *5<sup>th</sup> International Conference on Arch Bridges Arch’07*, Funchal.

Baptista, M. C. P. (2008). “Identificação e Caracterização da Modulação dos Sinais Digitais em RF.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, <[http://www.av.it.pt/nbcarvalho/docs/MsC\\_Diss/2008001648.pdf](http://www.av.it.pt/nbcarvalho/docs/MsC_Diss/2008001648.pdf)>. (Outubro 4, 2010).

Barrile V. and Pucinotti, R. (2005). "Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study." *NDT&E International*, 38, 596-604.

Bavusi, M.; Giocoli, A.; Piscitelli, S.; Sarris, A.; Soupios, P. and Vallianatos, F. (2008). "GPR survey to evaluate joint and crack geometry in the building of the Prefecture of Chania (Crete Island, Greece)." *12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Birmingham, UK,

<[http://soupios.chania.teicrete.gr/papers/Paper\\_Submission\\_Bavusi\\_et\\_al\\_6.pdf](http://soupios.chania.teicrete.gr/papers/Paper_Submission_Bavusi_et_al_6.pdf)>.

(Junho 21, 2010).

Benta, A. A., Tareco, H., Maranhão, H., Cardoso, C. (2008). "Pesquisa da profundidade de ocorrência de uma camada argilítica através de GPR." *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2º Congresso de Engenharia de Moçambique*, Maputo.

Borges, W.; Lago, A.; Fachin, S.; Elis, V. e Santos, E. (2006). "GPR utilizado na detecção da geometria de cavas usadas para disposição e resíduos de óleos lubrificantes." *Revista Brasileira de Geofísica*, <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v24n4/a03v24n4.pdf>>. (Dezembro 21, 2009).

Caeiro, C. M.; Serra, D. R.; Jorge, J. D.; Anielo, M. (2000). "James Clark Maxwell." *A Inteligência Artificial, Centro de Investigação para Tecnologias Interactivas*, <[http://www.citi.pt/educacao\\_final/trab\\_final\\_inteligencia\\_artificial/james\\_clerk\\_maxwell.html](http://www.citi.pt/educacao_final/trab_final_inteligencia_artificial/james_clerk_maxwell.html)>. (Dezembro 26, 2009).

Cassidy, N. (2008). "Workshop 1: Introduction to GPR." *12<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar*, University of Birmingham, UK.

Construções Técnicas, S.A. (1988). *Prospecção geotécnica para o estudo das fundações dos edifícios da Escola Superior de Tecnologia de Tomar*. Lisboa.

Costa, A. J. V. (2009). “Utilização do georadar na caracterização de pavimentos rodoviários.” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra,

<<http://www.geo-ndt.pt/DOWNLOAD/tabid/2960/language/pt-PT/Default.aspx>>.

(Julho 9, 2010).

Costa, A.; Arêde, A. e Costa, C. (2001). “Ponte de Vila Fria.” Projecto, IC-Instituto da Construção da FEUP.

Costa, C. M. R. (2009). “Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra.” Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa, C.; Arêde, A.; Costa, A. (2005). “Modelação numérica da Ponte de Vila Fria. Do projecto à entrada em serviço.” *Actas do 2º Seminário sobre A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação FEUP-DGEMN*, FEUP, Porto.

Costa, C.; Costa, P.; Arêde, A.; Costa, A. (2007). “Structural design, modelling, material testing and construction of a new stone masonry arch bridge in Vila Fria, Portugal.” *5<sup>th</sup> International Conference on Arch Bridges Arch’07*, Funchal.

Costa, P. M. Q. M. (2007). “Análise da Construção e do Comportamento numa Ponte de Pedra.” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, <[http://ncrep.fe.up.pt/web/artigos/tese\\_pc\\_final.pdf](http://ncrep.fe.up.pt/web/artigos/tese_pc_final.pdf)>. (Jul. 22, 2010).

Costa, T. e Lança, R. (2001). “Capítulo II – Escoamentos em meios porosos.” *Disciplina de Hidráulica Aplicada, Núcleo de Hidráulica e Ambiente*, <[http://w3.ualg.pt/~rlanca/sebenta-hid-aplicada/ha-02-escoamento\\_em\\_meios\\_porosos.pdf](http://w3.ualg.pt/~rlanca/sebenta-hid-aplicada/ha-02-escoamento_em_meios_porosos.pdf)>. (Março 24, 2010).

Cruz, N.; Tareco, H.; Gonçalves, F.; Vieira S. E.; Hipólito, A. (2008). “Caracterização de maciços cársicos com base em prospecção com Georadar. Um caso prático.” *XI Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, CD-ROM.

Cruz, P. J. S.; Topczewski, L.; Fernandes, F. M.; Lourenço, P. B. (2006). “Utilização do radar de prospecção geotécnica na localização das bainhas de pré-esforço nas pontes da Barra e de Lanheses.” *4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, <<http://hdl.handle.net/1822/6559>>. (Setembro 29, 2009).

David A., Linford N., Linford P. (2008). “Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation.” *English Heritage*, <[http://www.helm.org.uk/upload/pdf/Geophysical\\_LoRes.pdf](http://www.helm.org.uk/upload/pdf/Geophysical_LoRes.pdf)>. (Fevereiro 1, 2010).

E-escola (2002). “Michael Faraday.” Personalidades, Instituto Superior Técnico, <<http://www.e-escola.pt/personalidades.asp?nome=faraday-michael>>. (Novembro 10, 2009).

European GPR Association (2008). <<http://www.eurogpr.org/papers.htm>>. (Janeiro 22, 2010).

Fernandes, F. M. e Lourenço, P. B. (2007). “Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias.” *Congresso de Construção 2007, 3.º Congresso Nacional*, Coimbra, <<http://hdl.handle.net/1822/8343>>. (Setembro 29, 2009).

Fernandes, F. M. (2010). “A avaliação da espessura dos elementos de alvenaria através de georadar.” *Em Construção Magazin*, 36, 32-33.

Fernandes, F.; Lourenço, P.B.; Zanzi, L. (2006). “Avaliação da constituição de elementos estruturais através do radar de prospecção geotécnica.” *Engenharia e Vida*, <<http://hdl.handle.net/1822/6810>>. (Setembro 29, 2009).

Fernandes, F. M. C. P. (2006). "Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry." Tese de Doutorado em Engenharia Civil/ Estruturas, Universidade do Minho, <<http://hdl.handle.net/1822/6034>>. (Setembro 29, 2009).

Fernandes, F.M.; Sousa, D. J.; Lourenço, P.B. (2008). "Detecção de infra-estruturas de redes com recurso ao radar de prospecção geotécnica." *Engenharia e Vida*, 42, 22-26.

Fernandes, M. M. (1994). *Mecânica dos Solos*, Volume I, FEUP.

Figueiredo, A. J. P. (2009). "Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe." Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Fortunato, E. M. C. (2005). "Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga." Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, <<http://hdl.handle.net/10216/11441>>. (Junho 21, 2010).

Gandolfo, O. C. B, Souza, L. A. P., Tessler, M. G., Rodrigues, M. (2001). "Estratigrafia rasa da Ilha Comprida (SP): um exemplo de aplicação do GPR." *Revista Brasileira de Geofísica*, <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2001000300002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2001000300002)>. (Outubro 13, 2009).

Geo NDT (2008). <<http://www.geo-ndt.pt/GeoRadar/tabid/2651/language/pt-PT/Default.aspx>>. (Junho 9, 2010).

Google Maps (2010). <<http://maps.google.pt/>>. (Setembro 1, 2010).

Grangeia, C. e Matias, M. S. (2004). “Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Anã e S. Martinho de Árvore.” *Revista Portuguesa de Arqueologia*,  
<[http://www.igespar.pt/media/uploads/revistaportuguesadearqueologia/7\\_2/18.pdf](http://www.igespar.pt/media/uploads/revistaportuguesadearqueologia/7_2/18.pdf)>.

(Setembro 30, 2009).

Gregory, S. B. and Jol, H. M. (2007). “Stratigraphic analyses using GPR.” Geological Society of America. Google Livros,

<[http://books.google.pt/books?id=r0Wigl\\_qw5gC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](http://books.google.pt/books?id=r0Wigl_qw5gC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)>. (Junho 30, 2010).

GSSI a. “About GSSI.” <<http://www.geophysical.com/aboutgssi.htm>>. (Janeiro 5, 2010).

GSSI b. “Ballast Condition Assessment.”

<<http://www.geophysical.com/railevaluation.htm>>. (Setembro 1, 2010).

Guerreiro, H. J. P. (2000). “Exploração Subterrânea de Mármore. Aspectos geotécnicos.” Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa,

<[http://www.visaconsultores.com/pdf/Tese\\_MSc\\_HG.pdf](http://www.visaconsultores.com/pdf/Tese_MSc_HG.pdf)>. (Outubro 30, 2009).

Hammond, P. (1997). *Electromagnetism for Engineers*. An Introductory Course, Fourth Edition. Oxford University Press.

Hecht, E. (2002). *Óptica*. 2ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Hollmann, M. (2007). “Christian Huelsmeyer, the inventor.” *Radar World*,

<<http://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>>. (Dezembro 9, 2009).

IDS, Ingegneria dei Sistemi. <[http://www.idscompany.it/page.php?f=117&id\\_div=4](http://www.idscompany.it/page.php?f=117&id_div=4)>.

(Janeiro 23, 2010).

Instituto IBAM - Instituto per i Beni Archeologici e Monumentali, CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche, <<http://www.ibam.cnr.it/gpr2010/>>. (Agosto 16, 2010).



Júnior, J. G. O. (2001). “Dois testes de imageamento com GPR em problemas de controle ambiental em regiões tropicais :migração de dunas e localização de dutos de óleo enterrados.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, <<http://lakh.unm.edu/handle/10229/13659>> . (Outubro 4, 2010).

Lourenço, P. P., Krakowiak, K. J., Fernandes, F. M., Ramos, L. R., (2007). “Failure analysis of Monastery of Jerónimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models.” *Engineering Failure Analysis*, <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9169>>. (Setembro 2, 2010).

Lubowiecka, I.; Armesto, J.; Arias, P.; Lorenzo, H. (2009). “Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics.” *Engineering Structures*, Vol. 31, Issue 11, Pages 2667-2676.

Luís, J. (2005a). “3. Métodos eléctricos”. *Geofísica Ambiental*, <[http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas\\_cap3.pdf](http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap3.pdf)>. (Dezembro 9, 2009).

Luís, J. (2005b). “Georadar”. *Geofísica Ambiental 5ºano*, <[http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas\\_cap5.pdf](http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap5.pdf)>. (Outubro 9, 2009).

MALÅ Geoscience. <<http://www.malags.com/>>. (Janeiro 29, 2010).

“Manual de Instruções, versão 1.0.”, *RAMAC/GPR*, MALÅ Geoscience.

“Manual de Instruções, versão 1.4.”, *GroundVision*, MALÅ Geoscience.

Miranda, J. M. “Introdução ao Geomagnetismo.” <[http://www.idl.ul.pt/Eric\\_Font/gm\\_2009\\_a.pdf](http://www.idl.ul.pt/Eric_Font/gm_2009_a.pdf)>. (Dezembro 9, 2009).

Miranda, J. M.; Luís, J. F.; Costa, P. T., Santos, F.M. “Capítulo 5 – Geoelectricidade.”, *Fundamentos de Geofísica*, <[http://www.cgul.ul.pt/docs/Cap5\\_Geoelectricidade.pdf](http://www.cgul.ul.pt/docs/Cap5_Geoelectricidade.pdf)>. (Outubro 29, 2009).

Monaghan, W. D.; Trevits, M. A.; Sapko, M. J. (2005). "Evaluation of mine seals using ground penetrating radar." NIOSH, Pittsburgh Research Laboratory, Pittsburgh, PA. <<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/eomsu.pdf>>. (Junho 30, 2010).

Moreira, J. (1992). *Projecto para os espaços exteriores do campus do IPT*. PAISAGEM - Planeamento, Arquitectura e desenho Gráfico, Lda.

Moura, M. V. M.; Reyes-Péres, Y. A.; Gauw, D. S.; Silva, D. A. S.; Souza, A. M.; Pelosi A. P. M. R.; Lima-Filho, F. P. (2006). "Levantamento geofísico com GPR em um campo de dunas eólicas em Tibau do Sul/RN.", *Revista de Geologia*, <[http://www.revistadegeologia.ufc.br/08\\_2006.pdf](http://www.revistadegeologia.ufc.br/08_2006.pdf)>. (Outubro 13, 2009).

National Instruments (2009). "Using a Digitizer for Time-Domain Measurements." <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/10669>>. (Março 22, 2010).

National Library of Scotland (2009). "Robert Watson-Watt (1892-1973)." The Scientists, Scottish Science Hall of Fame, <<http://digital.nls.uk/scientists/biographies/robert-watson-watt/index.html>>. (Janeiro 17, 2010).

Olhoeft, G. R. (1999). "Applications and frustrations in using Ground Penetrating Radar." *Proceedings Ultra Wideband Conference*, Washington, DC, USA, <<http://www.g-p-r.com/UWB99.PDF>>. (Outubro 4, 2010).

Oliveira, J. P. L. (2009). "Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método da resistividade eléctrica." Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, <<http://hdl.handle.net/10362/2364>>. (Abril 14, 2010).

Orbán, Z. and Gutermann, M. (2009). "Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods." *Engineering Structures*, Vol. 31, Issue 10, Pages 2287-2298.

Patterson, J. E. (2003). "Application of Ground Penetrating Radar (GPR) at the Cryo-Genie Gem Pegmatite Mine, San Diego County, California." University of Calgary, Calgary, AB, Canadá,

<[http://www.minsocam.org/MSA/Special/Pig/PIG\\_articles/Cryo\\_Genie\\_Rpt10.pdf](http://www.minsocam.org/MSA/Special/Pig/PIG_articles/Cryo_Genie_Rpt10.pdf)>.

(Junho 30, 2010).

PENETRADAR corporation. <<http://www.penetradar.com>>. (Janeiro 23, 2010).

*Projecto de execução do troço do IC9 – Sublanço Alburitel / Nó de Carregueiros.*

Queiroz, L. A. V.; Silveira, C. S.; Mane, M. A.; Monsueto, R. L.; Afonso, F. P. L. A. (2007). "Caracterização de formações superficiais por meio de GPR (Radar de penetração no solo): Teresópolis, Rio de Janeiro." *XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, Natal, Rio de Janeiro,

<[http://www.fgel.uerj.br/labgis/producao/congressos%20e%20simp%F3sio/luiza\\_simpos.pdf](http://www.fgel.uerj.br/labgis/producao/congressos%20e%20simp%F3sio/luiza_simpos.pdf)>. (Outubro 20, 2009).

RADAR Systems, Inc. (<http://www.radsys.lv>). (Maio 30, 2010).

Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley & Sons, Chichester.

Ruffell, A. and McKinley, J. M. (2004). "Forensic geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations." *Earth-Science Reviews*, <<http://www.jeffreycreid.com/Forensic%20geology.pdf>>. (Setembro 16, 2010).

Santos, F. M. (2006a). "Capítulo 2. Propriedades Eléctricas das Rochas." *Prospecção Geofísica I*, <<http://www.cgul.ul.pt/disciplinas/tpgI/PG1-Capitulo2.pdf>>.

(Março 26, 2010).

Santos, F. M. (2006b). “Capítulo 4. Técnicas para investigação de estruturas superficiais – O método da resistividade.” *Prospecção geofísica I*, <<http://idl.ul.pt/FMSantos/PG1-Capitulo4-Parte1.pdf>>. (Julho 21, 2010).

Schon, J. H. (2004). *Physical Properties of Rocks, Volume 18: Fundamentals and Principles of Petrophysics (Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration)*. Pergamon.

Sensors & Software Inc. <<http://www.sensoft.ca/>>. (Janeiro 23, 2010).

Serway, R. A. (1996). *Física 3: Electricidade, Magnetismo e Óptica*. 3ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

Sousa, L. R.; Soares, M. R.; Oliveira, M.; Pereira, C. (2000). “Análise do comportamento estrutural do túnel rodoviário sob a pista do aeroporto Sá Carneiro.”, *VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, <[http://www.global.estgp.pt/engenharia/Alunos/eSebentas/CongressoGeotecnia/TEXTOS/Tema5/T5\\_A14.PDF](http://www.global.estgp.pt/engenharia/Alunos/eSebentas/CongressoGeotecnia/TEXTOS/Tema5/T5_A14.PDF)>. (Outubro 2, 2009).

Souza, M. M., (2005a). “Uso do Georadar (GPR) em Investigações Ambientais.” Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, <[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310976\\_05\\_pretextual.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310976_05_pretextual.pdf)>. (Janeiro 5, 2010).

Souza, M. M. (2005b) “3. Equipamentos utilizados.” <[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310976\\_05\\_cap\\_03.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310976_05_cap_03.pdf)>. (Janeiro 5, 2010).

Spoerer, A. (2009). “Inspeção não destrutiva de estruturas de concreto por georadar (GPR).”, *Revista Abendi*, <[http://www.abende.org.br/revista/edicao\\_32/pdf/32\\_artigo.pdf](http://www.abende.org.br/revista/edicao_32/pdf/32_artigo.pdf)>. (Dezembro 17, 2009).

TecBIS (Technology. Business. Innovation. SustainableGrowth), IPN (Instituto Pedro Nunes).

Topczewski, L. K. (2007). “Improvement and application of ground penetrating radar non-destructive technique for the concrete bridge inspection.” Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, <<http://hdl.handle.net/1822/6755>>. (Outubro 2, 2009).

Ulaby, F. T. (2007). “Electromagnetismo para Engenheiros.” Bookman. Google Livros, <[http://books.google.pt/books?id=lk-UBCDPZHAC&printsec=frontcover&source=gbs\\_v2\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.pt/books?id=lk-UBCDPZHAC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false)>. (Novembro 26, 2009).

Vieira, A. (2002). “Física III.” Departamento de Física, Instituto Superior de Engenharia do Porto, <<http://www.defi.isep.ipp.pt/~asv/isep/fisica3/apontamentos.pdf>>. (Outubro 1, 2010).

Villate, J. E. (1999). *Electromagnetismo*. McGRAW-HILL, Portugal.

Wuilloud, C. (2006). “Applications Geo-Radar et GPS dans le domaine des dangers naturels.” Séminaire SILS, HEV Sierre, <[http://www.sils-ch.ch/doc/LawiDetekt\\_Radar.pdf](http://www.sils-ch.ch/doc/LawiDetekt_Radar.pdf)>. (Novembro 23, 2009).

Yalçiner, C. C. (2009). “Investigation of buried objects with Ground Penetrating Radar: Application to archaeoseismology and palaeoseismology in the Buyuk Menderes Graben (Turkey).” Doctoral Thesis, l’Université Eskişehir Osmangazi, l’Université de Strasbourg, <[http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/1123/01/YALCINER\\_Cahit\\_Caglar\\_2009.pdf](http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/1123/01/YALCINER_Cahit_Caglar_2009.pdf)>. (Novembro 23, 2009).

## ANEXOS

## Anexo I: Registo das Sondagens de Coimbra

<b>Gabinete de Serviços Geotécnicos</b> Lda.		Registo de sondagem a trado oco com ensaios SPT Equipamento: SMA 630 - fabrico nacional				<b>SONDAGEM: S1</b>	
		Obra/Local: IPN - Coimbra				Cliente:	
		Data início: 13.01.2010 Data fim: 13.01.2010		Página: 01/01		IPN - Instituto Pedro Nunes (Labgeo)	

Prof. (m)	Complexo	Descrição	Simbologia	Ensaio SPT Pancadas						Ensaio	Nível Freático
				1ª fase	2ª e 3ª fases						
				10	20	30	40	50	60		
1	H	Terra Vegetal	※ ※ ※								
2	Quaternário	Argila com alguma fracção silteosa com pequenos seixos e cascalheira, de cor avermelhada e acastanhada, com calhaus sub-redondos dispersos		35 (16+19)							①
3		Silte argiloso de cor esverdeada, passando a areia silteosa com fracção argilosa com seixos e cascalheira, de cor castanha avermelhada, com calhaus sub-redondos dispersos		45 (23+22)							②
4	Triásico "Grés de Sives"	Areia silteosa com pequenos seixos e cascalheira gresosa de cor castanha avermelhada, com nível de silte arenoso de cor cinzenta		29 (13+16)							③
5				60 (60+0)	Entrou 8 cm					④	
6				60	Entrou 10 cm					⑤	
7		Grés									
8		FIM DE SONDAGEM									
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											

EQUIPAMENTO: SMA 630 - fabrico nacional Sondagem a trado oco: Diâm. ext.: 230 mm Diâm. int.: 86 mm	COMPRIMENTO: 7.3 m COTA: m COORDENADAS: M= P= VERIFICOU: Teresa Vargas/ Paula Gonçalves
OBSERVAÇÕES: H: Holocénico	

(TecBIS, IPN)

<b>Gabinete de Serviços Geotécnicos</b> Lda.		Registo de sondagem a trado oco com ensaios SPT Equipamento: SMA 630 - fabrico nacional		<b>SONDAGEM: S2</b>	
		Obra/Local: IPN - Coimbra		Cliente:	
		Data início: 14.01.2010 Data fim: 14.01.2010	Página: 01/01		IPN - Instituto Pedro Nunes (Labgeo)

Prof. (m)	Complexo	Descrição	Simbologia	Ensaio SPT Pancadas							Ensaio	Nível Freático
				1ª fase	2ª e 3ª fases							
				10	20	30	40	50	60			
1	Quaternário	Silte com fracção argilosa, por vezes com alguma fracção arenosa, com cascalheira, de cor castanha avermelhada e cinzentada, com calhaus sub-redondos		27	(11+16)						6	
2												
3		Argila silto-arenosa, de cor castanha avermelhada, com calhaus sub-redondos		14	(6+8)						7	
4	Triásico "Grés de Sives"	Silte argiloso e argila siltosa de cor avermelhada e esverdeada		23	(9+14)						8	
5												
6		Silte arenoso com cascalho de cor alaranjada, passando a argila arenosa de cor cinzenta		60	(41+19)						9	
7		Grés									10	
8		FIM DE SONDAGEM										
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												

EQUIPAMENTO: SMA 630 - fabrico nacional Sondagem a trado oco: Diâm. ext.: 230 mm Diâm. int.: 86 mm	COMPRIMENTO: 7.4 m
	COTA: m
OBSERVAÇÕES: T: Triásico	COORDENADAS: M= P=
	VERIFICOU: Teresa Verugas/ Paula Gonçalves

(TecBIS, IPN)



<b>Gabinete de Serviços Geotécnicos</b> Lda.		Registo de sondagem a trado oco com ensaios SPT Equipamento: SMA 630 - fabrico nacional				<b>SONDAGEM: S4</b>	
		Obra/Local: IPN - Coimbra				Cliente:	
		Data início: 15.01.2010 Data fim: 15.01.2010		Página: 01/01		IPN - Instituto Pedro Nunes (Labgeo)	

Prof. (m)	Complexo	Descrição	Simbologia	Ensaio SPT Pancadas						Ensaio	Nível Freático
				1ª fase	2ª e 3ª fases						
				10	20	30	40	50	60		
1	Triásico "Grés de Sives"	Vala									 NF: 2.6 m
2											
3											
4											
5		Areia fina silto-argilosa por vezes com pequenos seixos dispersos de cor castanha avermelhada		26	60 (35+25) Entrou 27 cm					16	
6				47	60 (60+0) Entrou 7 cm					17	
7		Silte argiloso com alguma fracção argilosa com seixos e cascalheira dispersos de cor castanha avermelhada		24	60 (32+28) Entrou 27 cm					18	
8		FIM DE SONDAGEM									
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											

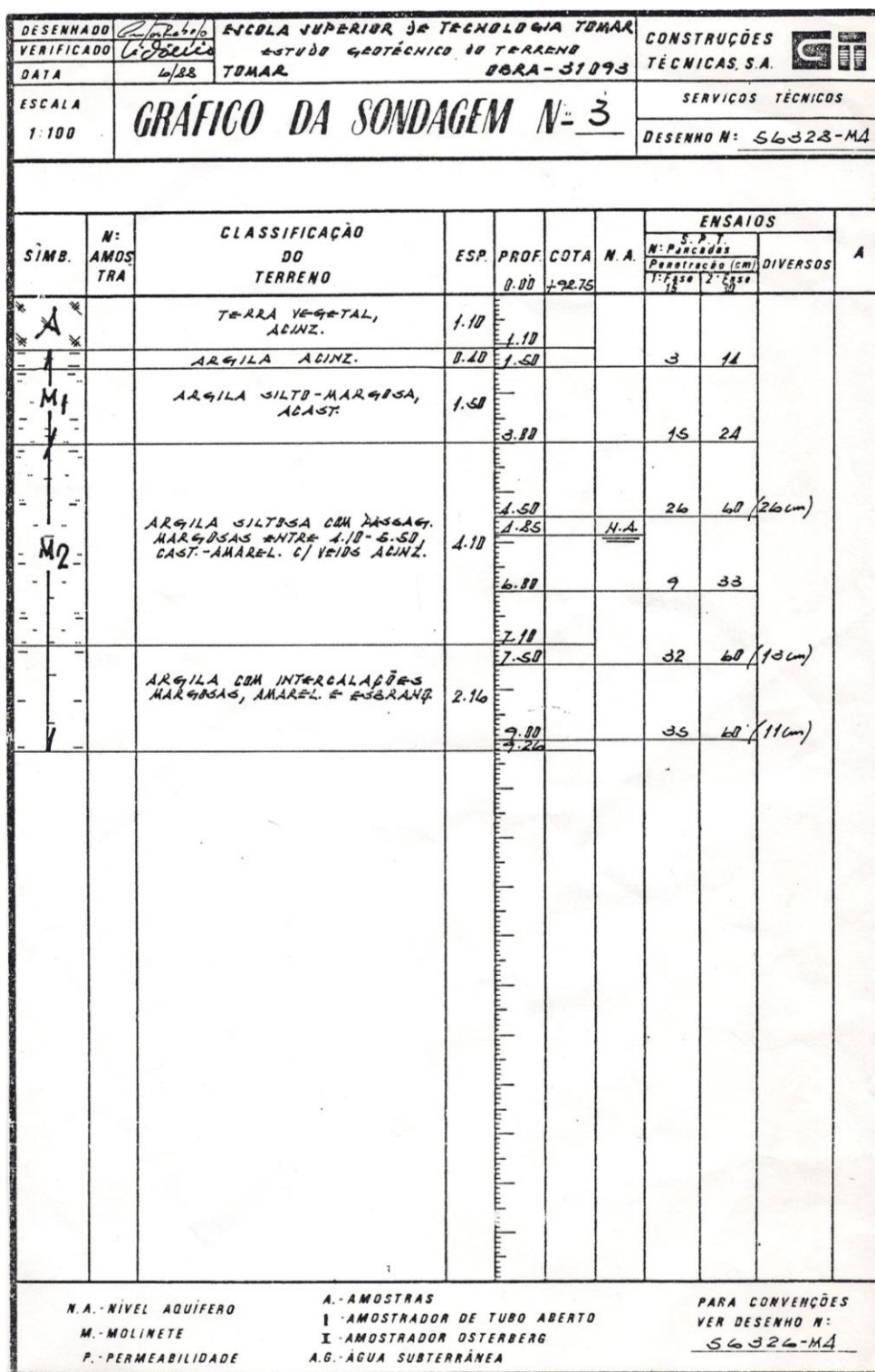
EQUIPAMENTO: SMA 630 - fabrico nacional Sondagem a trado oco: Diâm. ext.: 230 mm Diâm. int.: 86 mm	COMPRIMENTO: 7.5 m
	COTA: m
OBSERVAÇÕES: Sondagem efectuada após execução da Vala 5. Sondagem iniciada aos 3.5m de profundidade no interior da vala.	COORDENADAS: M= P=
	VERIFICOU: Teresa Verças / Paula Gonçalves

(TecBIS, IPN)

Nota: A sondagem S4 corresponde à sondagem S3 na Figura 22.

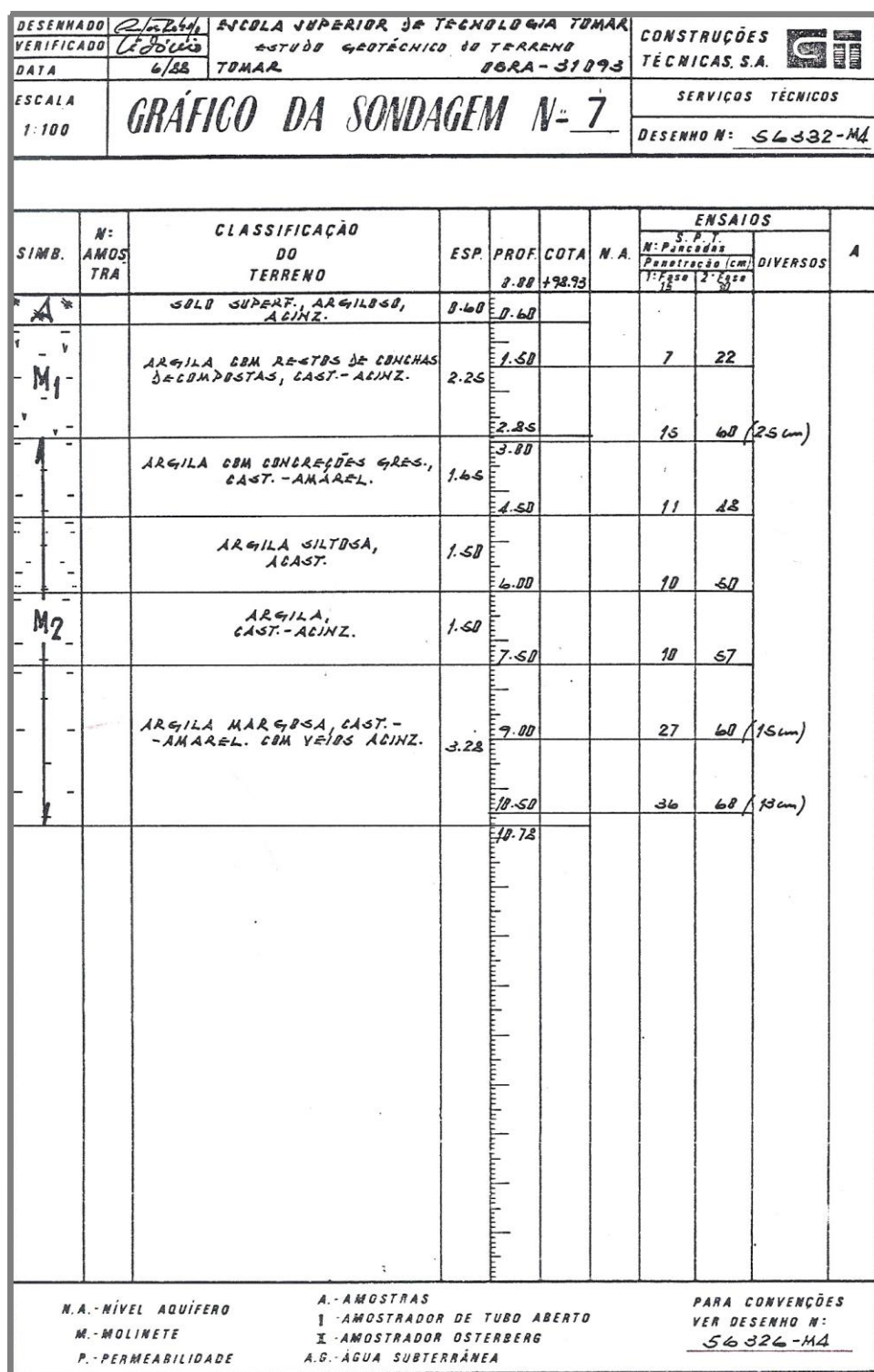


## Anexo II: Sondagens do Instituto Politécnico de Tomar.



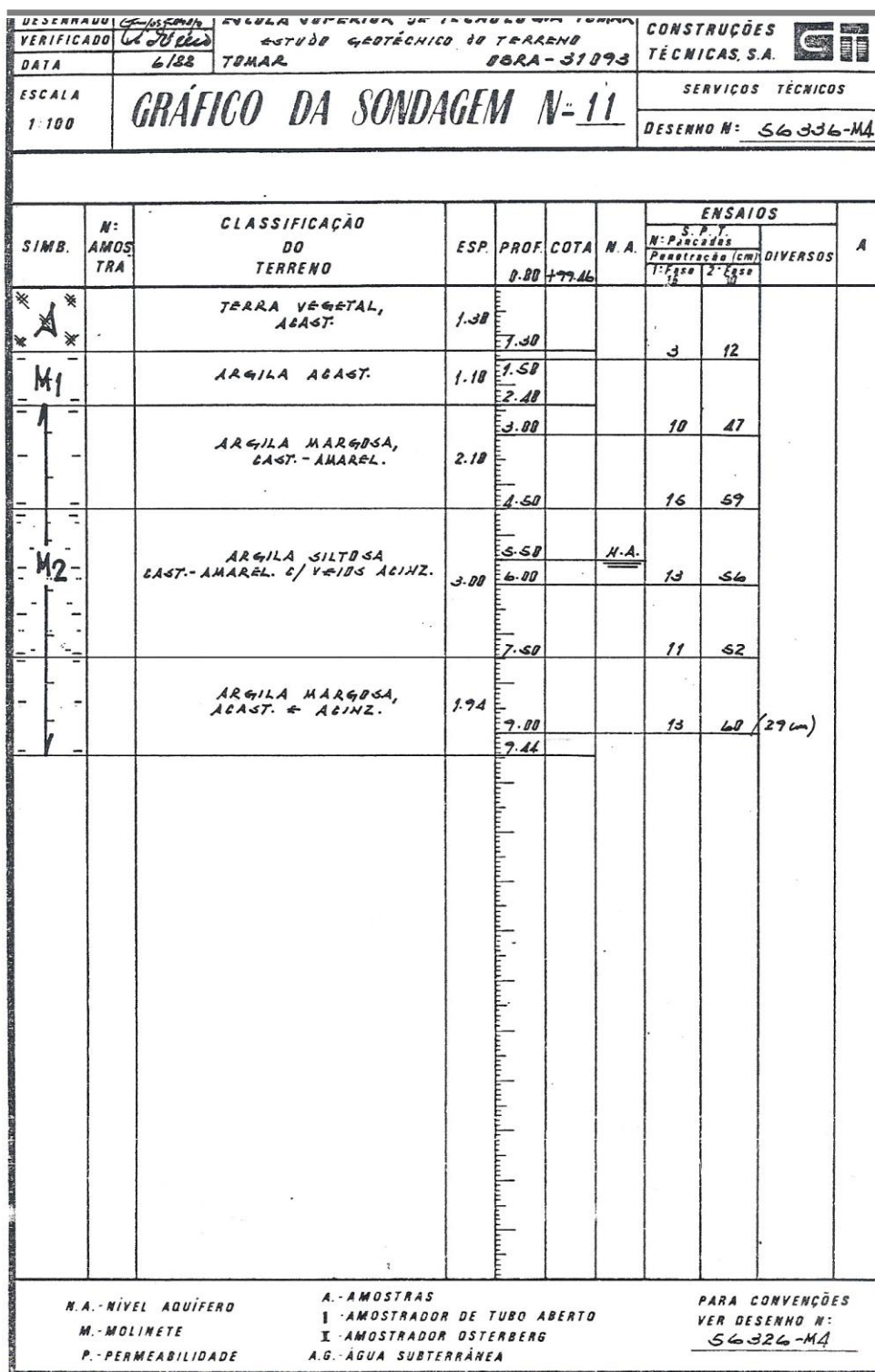
(Construções Técnicas, S.A., 1988)

Nota: O gráfico da sondagem n.º3 corresponde à sondagem 1 da Figura 28.



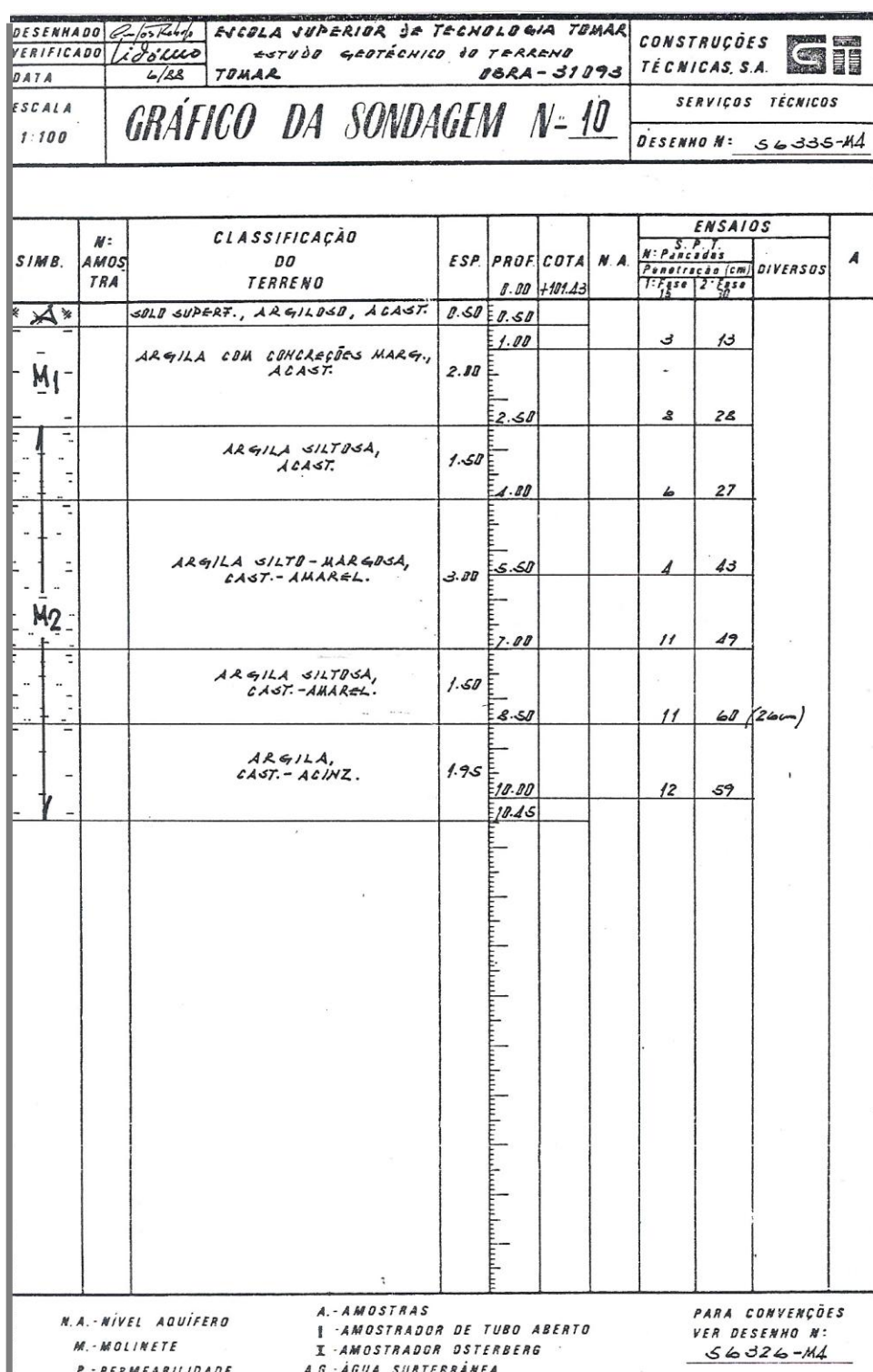
(Construções Técnicas, S.A., 1988)

Nota: O gráfico da sondagem n.º7 corresponde à sondagem 2 das Figuras 28 e 60.



(Construções Técnicas, S.A., 1988)

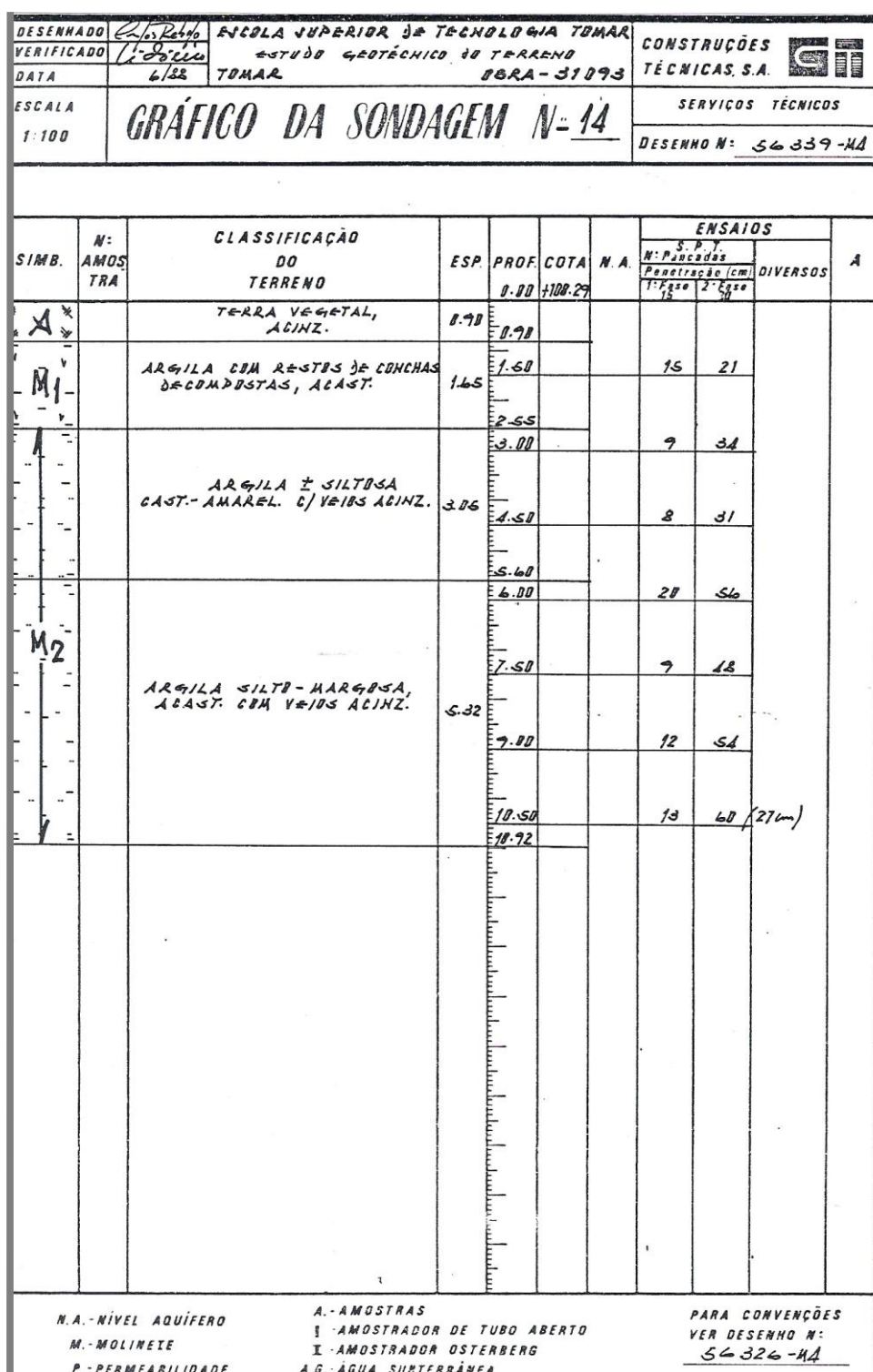
Nota: O gráfico da sondagem n.º 11 corresponde à sondagem 3 da Figura 60.



(Construções Técnicas, S.A., 1988)

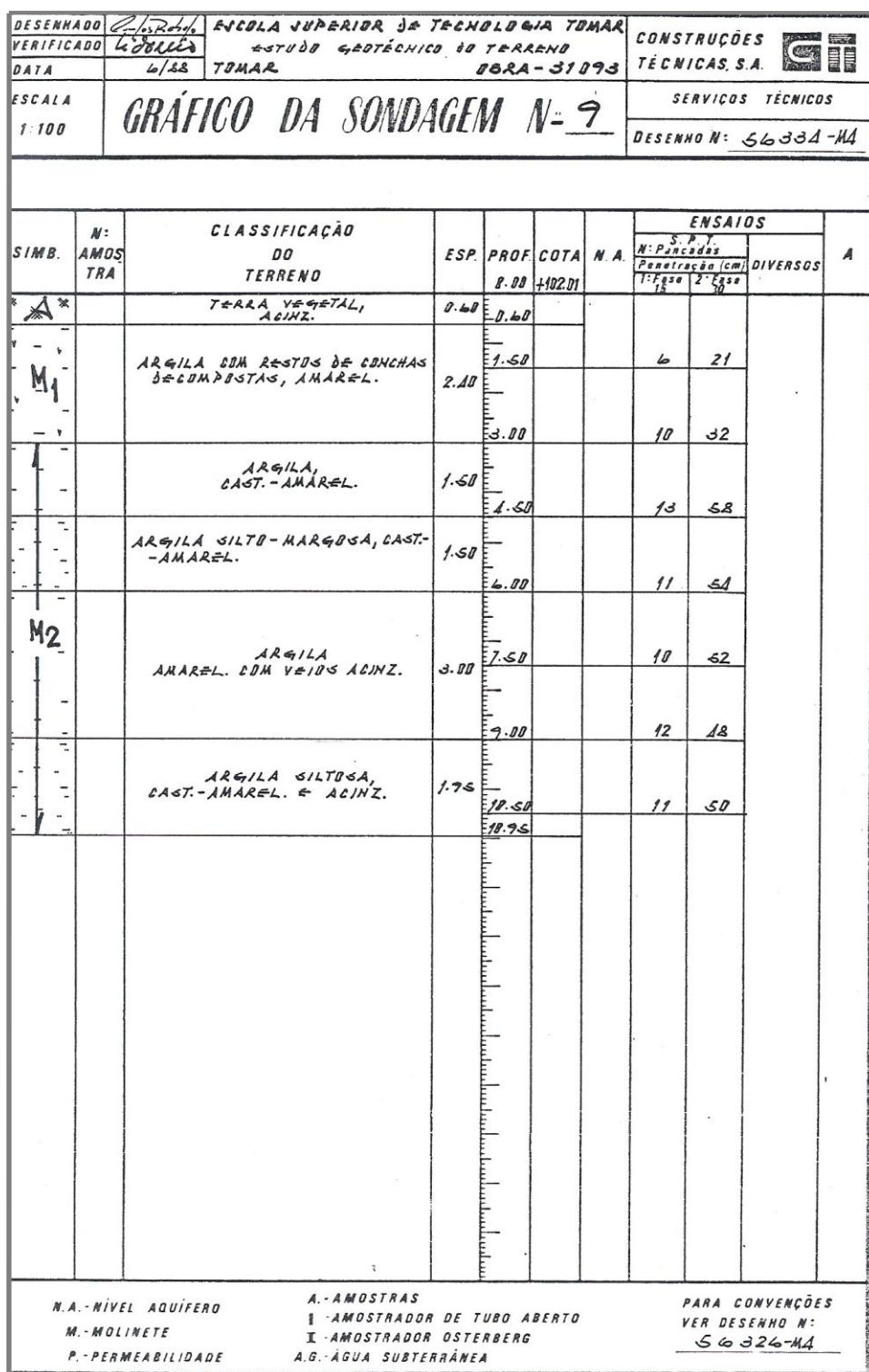
Nota: O gráfico da sondagem n.º10 corresponde à sondagem 4 da Figura 60.





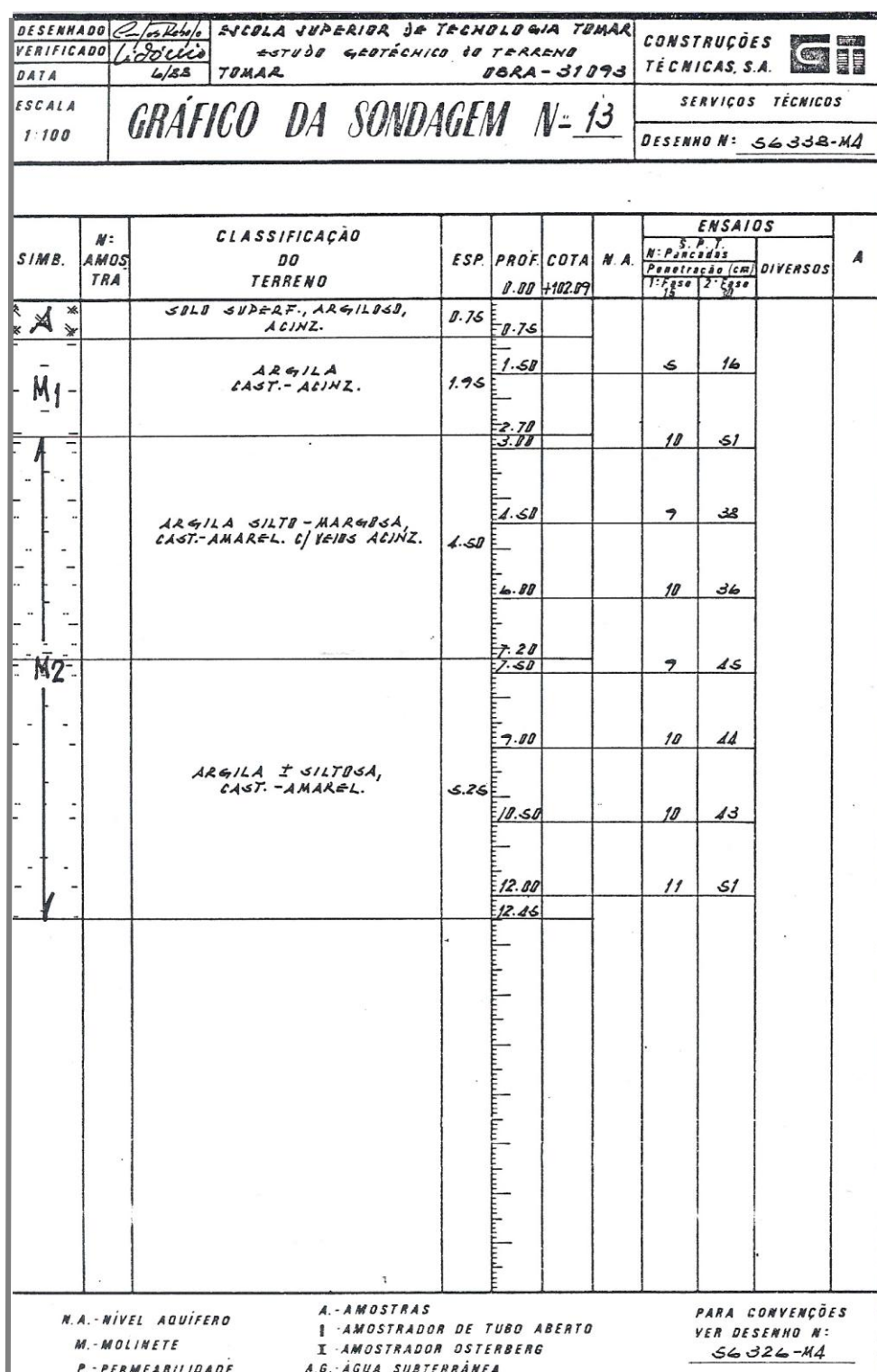
(Construções Técnicas, S.A., 1988)

Nota: O gráfico da sondagem n.º 14 corresponde à sondagem 5 da Figura 60.



(Construções Técnicas, S.A., 1988)

Nota: O gráfico da sondagem n.º 9 corresponde à sondagem 6 da Figura 60.



(Construções Técnicas, S.A., 1988)

Nota: O gráfico da sondagem n.º 13 corresponde à sondagem 7 da Figura 60.